

# MASTER THESIS

von

Nicolas Overbeck

Matrikel-Nr. 11107790

---

*Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme  
einer Abblendvorrichtung zur Leistungsregulierung  
eines Hochflussdichte-Sonnensimulators*

*Development, design and commissioning of a shutter  
for power regulation in a high-flux solar-simulator*

---

vorgelegt an der

Technischen Hochschule Köln

Cologne University of Applied Sciences

09 Fakultät für Anlagen-, Energie- und Maschinensysteme

Erstprüfer: Prof. Dr. Stefan Grünwald  
Technische Hochschule Köln

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Hans-Gerd Dibowski  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Köln, den 16. Januar 2017

## TECHNISCHE HOCHSCHULE KÖLN

**Zusammenfassung****Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme einer Abblendvorrichtung zur Leistungsregulierung eines Hochflusssichte-Sonnensimulators**

von Nicolas Overbeck

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Anforderungen an eine Abblendvorrichtung in einem Hochflusssichte-Sonnensimulator untersucht. Hierbei wird auf den Betriebsablauf der Versuchsanlage eingegangen und bisherige Abblendvorrichtungen analysiert. Im Anschluss werden verschiedene Konzepte entwickelt, welche den gegebenen Anforderungen gerecht werden. Nach einem Auswahlverfahren wird aus verschiedenen Konzepten ein Design ausgewählt. Dieses Design wird daraufhin auskonstruiert. Neben der mechanischen Belastung ist die thermische Belastung nicht zu unterschätzen. Um diese bei der Konstruktion zu berücksichtigen werden in einer experimentellen Versuchsreihe die zu erwartenden Temperaturen ermittelt. Anhand des ausgearbeiteten Modells werden Hersteller und Lieferanten kontaktiert und die benötigten Komponenten in Auftrag gegeben. Neben der konstruktiven Seite wird eine Software entwickelt, mit der eine Bedienung der Abblendvorrichtung ermöglicht wird. Der Abschluss der Arbeit bildet der Aufbau und die Inbetriebnahme der Abblendvorrichtung. Hierzu wird die Anlage verschiedenen Versuchsreihen unterzogen um deren Funktionstüchtigkeit zu überprüfen. Diese sind erfolgreich verlaufen, woraufhin die neuentwickelte Anlage mit dem Abschluss dieser Arbeit in Betrieb genommen werden kann.

## Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG .....	I
INHALTSVERZEICHNIS .....	II
SYMBOLVERZEICHNIS.....	IV
1 <b>EINLEITUNG</b> .....	1
1.1     Vorstellung der Versuchseinrichtung.....	1
1.2     Vorstellung ausgewählter Experimente .....	4
2 <b>AUFGABENSTELLUNG</b> .....	6
2.1     Zielsetzung .....	6
3 <b>BETRIEB DES HOCHLEISTUNGSSTRAHLERS</b> .....	8
3.1     Aufbau.....	8
3.2     Flussdichtemessverfahren .....	9
3.3     Eigenschaften eines Ellipsoids.....	13
4 <b>DESIGNAUSWAHL</b> .....	21
4.1     Bisherige Shattersysteme im Vergleich .....	21
4.2     Recherche .....	24
4.2.1     Konkurrenz.....	24
4.2.2     Lösungen aus anderen Technikbereichen .....	25
4.3     Morphologischer Kasten .....	28
4.4     Vorbewertung der Lösungsvarianten .....	30
4.5     Nutzwertanalyse .....	34
5 <b>KONSTRUKTION</b> .....	40
5.1     Ermittlung der thermischen Belastung .....	40
5.2     Grobgestaltung .....	45
5.2.1     Anordnung der Komponenten.....	45
5.2.2     Gestaltung von Führung und Antrieb .....	47
5.2.3     Kühlung .....	49

5.2.4	Grobentwurf .....	50
5.3	Feingestaltung .....	51
5.3.1	Auslegung des Antriebs .....	54
5.3.2	Auslegung des Riemengetriebes .....	55
5.3.3	Lebensdauerberechnung der Lagereinheit .....	57
5.3.4	Bestimmung des erforderlichen Wellendurchmessers .....	59
5.3.5	Lebensdauerberechnung der C-Schienenführung .....	60
5.4	Ausarbeitung .....	62
6	SOFTWAREENTWICKLUNG .....	67
6.1	Bedieneroberfläche .....	68
6.2	Blockdiagramme .....	71
7	AUFBAU UND INBETRIEBNAHME .....	78
8	FAZIT UND AUSBLICK .....	83
9	LITERATURVERZEICHNIS .....	85
	ANHANG .....	88
	A Allgemeines .....	88
	B Technische Zeichnungen .....	91
	C LabView® Sub-VI's .....	99
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	V
	TABELLENVERZEICHNIS .....	X
	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....	XI
	DANKSAGUNG .....	XII



## Symbolverzeichnis

Lateinische Formelzeichen		
$a$	Beschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$b$	Zahnriemenbreite	[mm]
$C$	dynamische Tragzahl	[kN]
$d$	Durchmesser	[mm]
$d_{z,g}$	Durchmesser der großen Zahnriemenscheibe	[mm]
$F_a$	Axialkraft	[N]
$F_{An}$	Antriebskraft	[N]
$F_G$	Gewichtskraft	[N]
$F_M$	Kraft aus Moment	[N]
$F_R$	Gesamtreibkraft	[N]
$F_{R,G}$	Gewichtsreibkraft	[N]
$F_{R,F}$	Führungsreibkraft	[N]
$F_t$	Umfangskraft	[N]
$F_T$	Trägheitskraft	[N]
$F_{w0}$	Wellenkraft im Stillstand	[N]
$K_A$	Anwendungsfaktor	[-]
$m$	Masse	[kg]
$M$	Moment	[Nm]
$M_b$	Biegemoment	[Nm]
$M_v$	Vergleichsmoment	[Nm]
$n$	Drehzahl	[min <sup>-1</sup> ]
$P$	Leistung	[kW]
$P$	dynamisch äquivalente Lagerbelastung	[kN]
$P_{spez}$	spezifische Leistung	[kW/mm]
$T$	Torsionsmoment	[Nm]
$u_{z,g}$	Umfang der großen Zahnriemenscheibe	[mm]
$v$	Geschwindigkeit	[m/s]
$X$	Radialfaktor	[-]
$Y$	Axialfaktor	[-]
$z$	Zähnezahl	[-]
$z_e$	eingreifende Zähnezahl	[-]
Griechische Formelzeichen		
$\mu_R$	Rollreibungswert	[-]
$\sigma_{b,zul}$	Zulässige Biegespannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{t,zul}$	Zulässige Torsionsspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]

# 1 Einleitung

## 1.1 Vorstellung der Versuchseinrichtung

Am Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (kurz DLR) am Standort Köln wird an aktuellen Projekten aus Industrie und Öffentlichkeit geforscht. Einer der Hauptaufgaben des Instituts liegt in der Durchführung von Experimenten mit konzentrierter Sonnenstrahlung. Hierunter versteht sich die Bündelung von einfallender Sonnenstrahlung zur Erzeugung höherer Energiedichten. Zur Durchführung von Experimenten dieser Art stehen am Standort Köln zwei Versuchseinrichtungen zur Verfügung. Am sogenannten Sonnenofen wird die einfallende Sonnenstrahlung mit einem Heliostaten eingefangen und parallel auf den sogenannten Konzentrator reflektiert, welcher wiederum die Strahlung in einem Punkt bündelt (siehe Abbildung 1). Ein Heliostat ist ein sonnengeführter Spiegel, welcher die einfallende Strahlung unabhängig vom Sonnenstand auf eine gezielte Fläche reflektiert. Der Konzentrator besteht aus vielen kleinen ausgerichteten Spiegeln, welche die einfallende Strahlung in einem festgelegten Punkt bündeln.

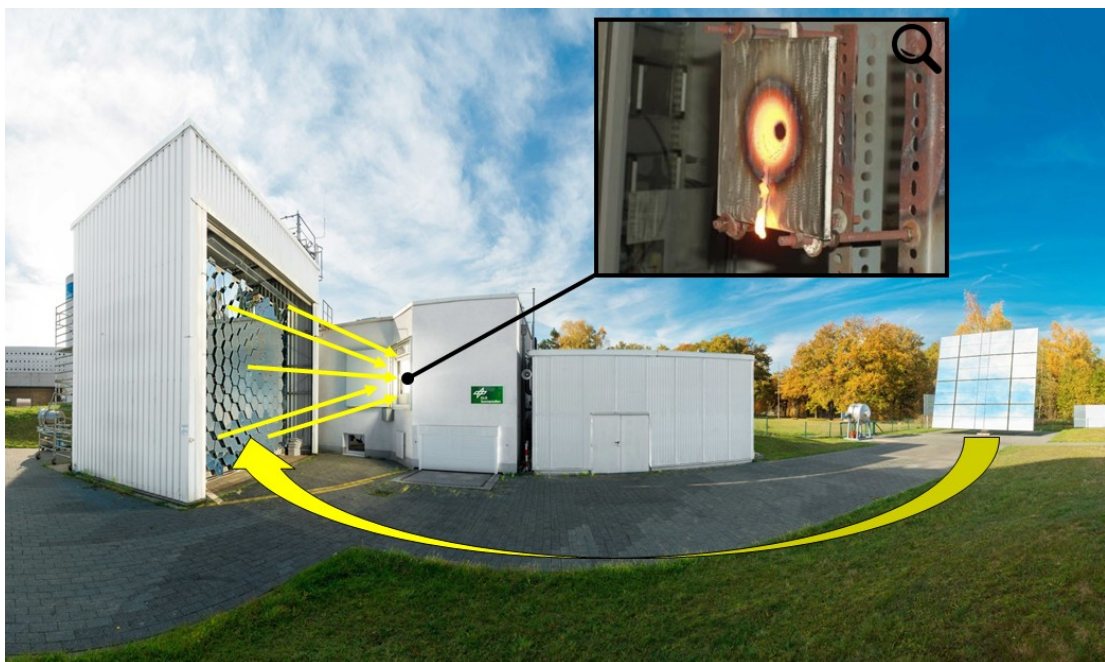


Abbildung 1 Arbeitsweise des Sonnenofens am Standort Köln (verändert nach [1])

Die entstehende Strahlungsleistung ist abhängig von der Strahlungsintensität. Außerhalb der Erdatmosphäre beträgt die von der Sonne ausgestrahlte Strahlungsintensität ca.  $1,4\text{kW/m}^2$  (Solarkonstante) [1]. Diese verringert sich aufgrund von Absorption und Reflektion in der Erdatmosphäre.

Der sogenannte DNI-Wert (Direct Normal Irradiance) beschreibt diesen reduzierten Wert, also die Direkteinstrahlung der Sonne auf die Erdoberfläche. Je nach Wetterlage kann der DNI Maximalwerte bis ca.  $0,9\text{kW/m}^2$  annehmen. Über die Spiegelfläche des Heliostaten wird somit eine Leistung von ca.  $22\text{kW}$  eingefangen. Durch die Bündelung dieser Strahlung können Spitzenleistungsdichten von  $4,5\text{MW/m}^2$  erzielt werden. Im Fokus entstehen dabei Maximaltemperaturen von bis zu  $2500^\circ\text{C}$ . [1]

Neben dem Sonnenofen betreibt das DLR einen weiteren Versuchsstand am Standort Köln, dem Hochflusssdichte-Sonnensimulator (auch Hochleistungsstrahler oder kurz HLS genannt) (siehe Abbildung 2), welcher maßgeblich Bestandteil dieser Arbeit ist. Anders als der eben vorgestellte Sonnenofen wird jedoch keine Sonnenstrahlung eingefangen, sondern eine künstliche Sonnenstrahlung erzeugt. Hierzu erzeugen 10 Xenon-Kurzbogenlampen eine effektive Strahlungsleistung von  $20\text{kW}$ . Jede Lampe ist in einem elliptischen Reflektorspiegel positioniert, welcher die Strahlung ähnlich des Konzentrators bündelt. So entstehen analog zum Sonnenofen im Fokus sehr hohe Leistungsdichten. Die Vorteile des Hochleistungsstrahlers liegen im zeit- und wetterunabhängigem Betrieb und der variablen Strahlleistung. Dies ermöglicht die Durchführung von Experimenten bei schlechtem Wetter bzw. bei Nacht und die Einstellung der Strahlungsleistung je nach Kundenwunsch.

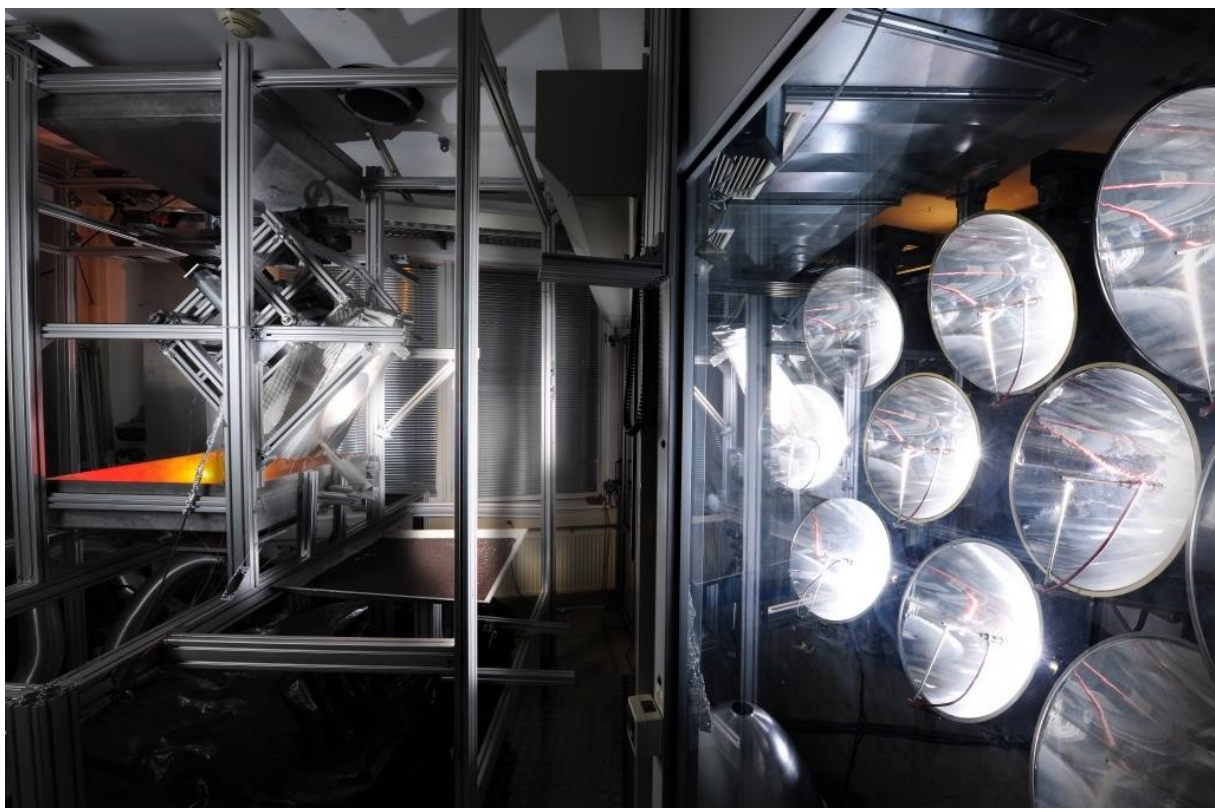
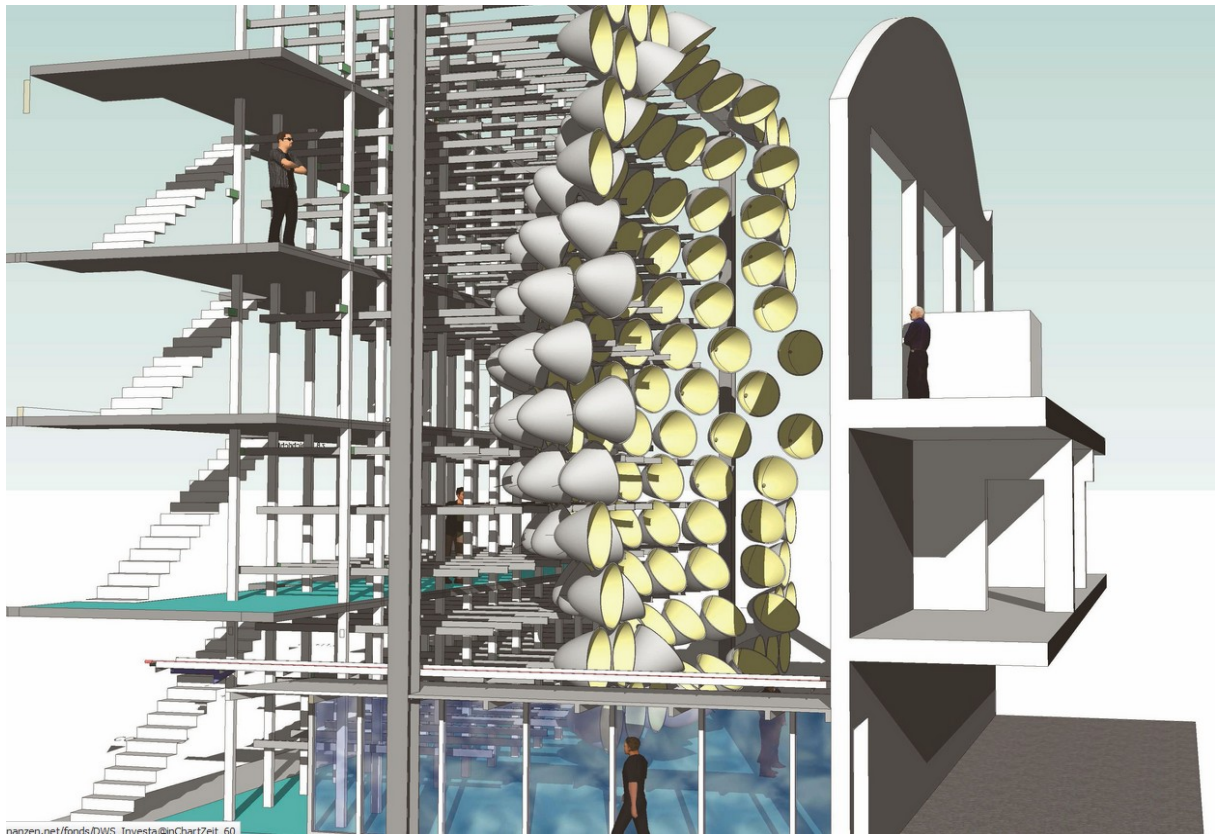


Abbildung 2 Aufbau des Hochleistungsstrahlers [1]

Neben dem Hochleistungsstrahler am Standort Köln wird im Auftrag des DLR zurzeit ein weiterer Hochleistungsstrahler am Standort Jülich gebaut. Dieser besteht aus 149 Xenon-Kurzbogenlampen und ist somit der weltweit größte seiner Art (siehe Abbildung 3). Die Gesamtleistung soll 250 kW betragen und die theoretisch erreichbaren Temperaturen liegen bei 3500°C. [1]

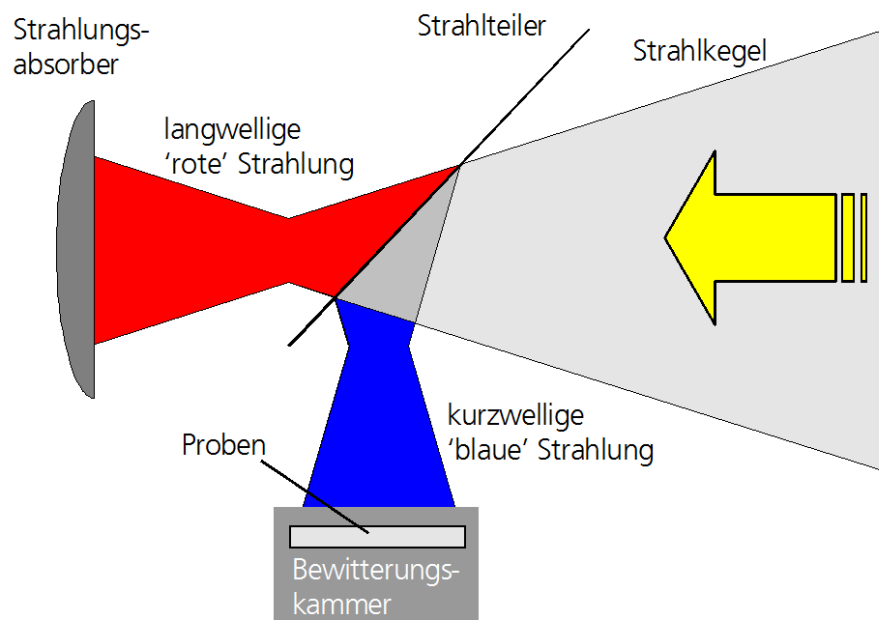


**Abbildung 3** Modell des sich im Bau befindlichen SynLight [1]

## 1.2 Vorstellung ausgewählter Experimente

Um ein Verständnis für die Notwendigkeit der Versuchseinrichtungen zu bekommen, sollen im Folgenden ausgewählte Experimente vorgestellt werden.

Aufgrund der hohen Intensität der Strahlung lassen sich Alterungsprozesse beschleunigt simulieren. Bei der Herstellung von Kunststoffen und Asphalt spielt z.B. die UV-Beständigkeit eine wichtige Rolle. Wichtig hierbei ist die Trennung der energiereichen IR-Strahlung von der benötigten UV-Strahlung (siehe Abbildung 4). Durch die Konzentration der UV-Strahlung kann eine Strahlungsbelastung von einem Jahr innerhalb von 11 Tagen simuliert werden. Durch die verkürzte Versuchsdauer können Auftraggeber demnach viel Zeit und somit Kosten bei der Erprobung neuer Materialien einsparen.



**Abbildung 4 Versuchsaufbau zur Simulation beschleunigter Alterungsprozesse [1]**

Ein weiteres aktuelles Projekt zielt auf die solare CO<sub>2</sub>-freie Wasserstofferzeugung ab. Im Bereich der Automobiliät ist Wasserstoff als Treibstoff einer der vielversprechenden Ansätze zur Reduzierung der Abgase. Dieser Ansatz ist jedoch nur dann wirksam, wenn der Wasserstoff selbst aus erneuerbaren Energien und nicht aus fossiler oder atomarer Energie gewonnen wird. In einer Versuchskammer wird das Wasser in einem geschlossenen thermochemischen Prozess mittels der Solarstrahlung gespalten, bei der Wasserstoff als Endprodukt entsteht.



Zuletzt soll ein Projekt aus der Raumfahrt vorgestellt werden. Zurzeit ist die ISS (International Space Station) die einzige bemannte Raumstation außerhalb der Erde. Zumal die Lebenszeit der ISS begrenzt ist, wird angedacht eine stationäre Station auf dem Mond zu errichten (siehe Abbildung 5). Als Kooperationspartner des DLR erforscht die European Space Agency (kurz: ESA) Möglichkeiten zum Bau einer solchen Mondstation. Die Schwierigkeiten zur Errichtung einer Mondstation fangen bereits mit dem Transport der Baumaterialien an. Massives Baumaterial von der Erde zum Mond zu transportieren ist sehr kostenintensiv. Deshalb zielt ein Ansatz darauf ab, Mondstaub (Regolith) als Baumaterial zu verwenden. Nach dem ähnlichen Prinzip wie bei einem 3D-Drucker soll dieser Schichtweise aufgeschmolzen werden. Der Druckprozess besteht in der Auftragung einer dünnen Regolithschicht und dessen Aufschmelzung. Zur Aufschmelzung der Schichten wird gebündeltes Sonnenlicht verwendet. Dieser Prozess wird beliebig oft wiederholt bis das gewünschte Bauelement hergestellt ist. In einem aktuellen Forschungsprojekt wird dieses Verfahren anhand von künstlichem Mondstaub erprobt. Der Hochleistungsstrahler dient dabei als künstliche Sonne.



Abbildung 5 Visualisierte Darstellung eines Mond-Laboratoriums [2]

## 2 Aufgabenstellung

Die zugrundeliegende Arbeit hat zur Aufgabe eine Vorrichtung für den Hochleistungstrahler zu entwickeln, welche die erzeugte Strahlung der Xenon-Kurzbogenlampen reguliert. Bei der Durchführung von Experimenten ist oftmals eine Regulierung der Strahlungsleistung erforderlich. Zurzeit besteht lediglich die Möglichkeit einzelne Lampen auszuschalten. Nach Kundenwünschen ist jedoch eine feinere Leistungsregulierung gewünscht. Zudem erfordern einige Experimente kurzzeitige Bestrahlungsintervalle.

Die Lampen selbst benötigen einen konstanten Betriebsstrom. Daher ist eine Leistungsregelung über den Anodenstrom der Lampen nicht möglich. Es ist ebenfalls nicht möglich die Lampen kurzzeitig an- und auszuschalten. Eine Regulierung des Anodenstroms und das vermehrte An- und Ausschalten der Lampen führen zu einer deutlichen Verkürzung der Lebensdauer der sehr kostenintensiven Lampen.

Aus dem oben genannten Gründen ist eine steuerbare Abblendvorrichtung, genannt Shutter, erforderlich.

### 2.1 Zielsetzung

Der Shutter soll die einfallende Strahlung begrenzen, wodurch die Leistung im Fokus reguliert werden kann. Die vorläufige Position des Shutters ist in der Schutztrennwand vorzusehen (siehe Abbildung 6). Zudem soll sich der Shutter innerhalb einer festgelegten Zeit vollständig öffnen und schließen können um auch dem Wunsch der Durchführung von kurzzeitigen Bestrahlungsintervallen gerecht zu werden.

Es ist vorgesehen sich im ersten Schritt auf ein Shutterdesign festzulegen. Hierzu sollen vorhandene Konzepte analysiert und neue Ideen ergänzt werden. Anhand einer nachvollziehbaren Bewertung ist ein Design auszuwählen, welches im Anschluss auskonstruiert wird. Danach erfolgen die Auswahl geeigneter Lieferanten und die in Auftraggebung der benötigten Komponenten. Die Bedienung des Shutters soll über eine Programmoberfläche mittels LabView erstellt werden. Eine Implementierung der Software in die bestehende Bedienoberfläche ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Der Abschluss der Arbeit bildet der Aufbau und die Inbetriebnahme des neuen Shutters.

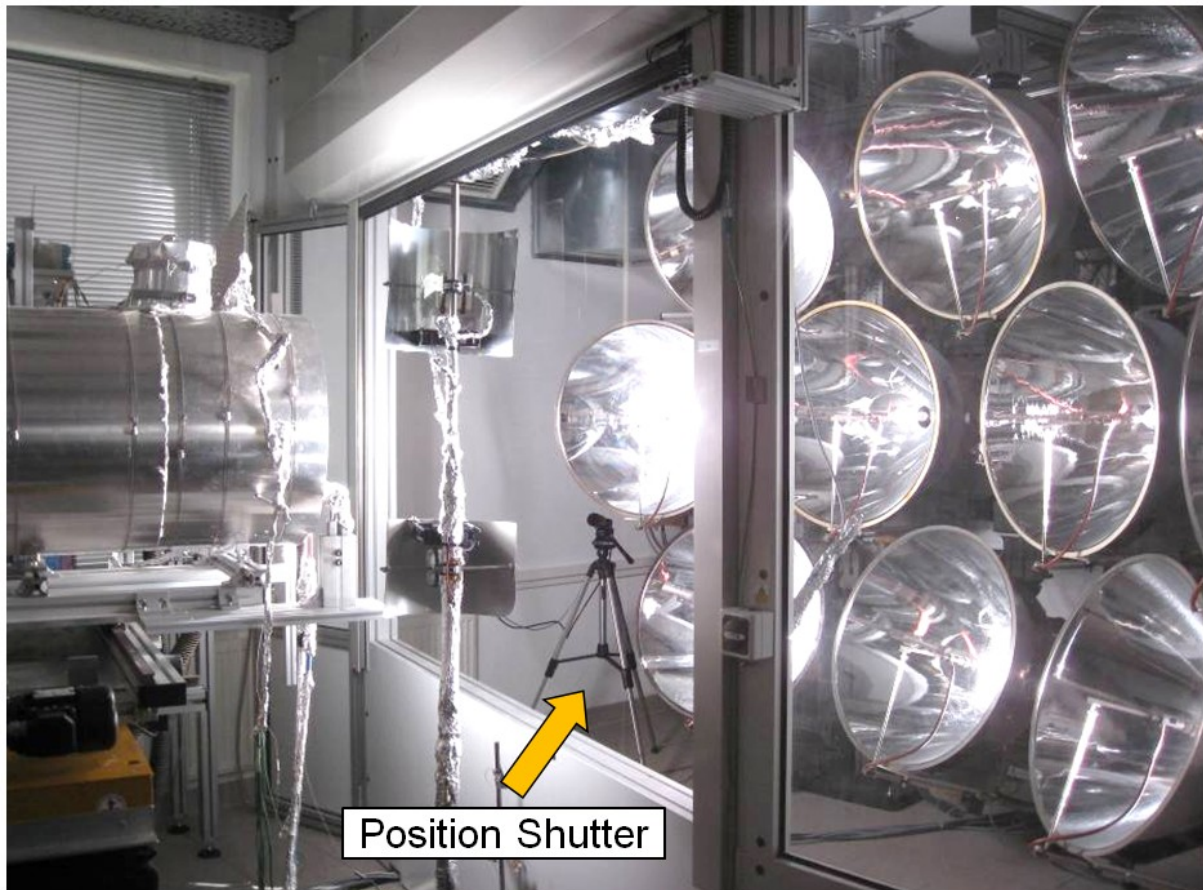


Abbildung 6 Angedachte Position des Shutters (verändert nach [1])



### 3 Betrieb des Hochleistungsstrahlers

#### 3.1 Aufbau

Der Hochleistungsstrahler wird durch eine Trennwand räumlich geteilt (siehe Abbildung 7). Im Versuchsraum werden die jeweiligen experimentellen Aufbauten positioniert. Der Strahlerraum beinhaltet die 10 Xenon-Kurzbogenlampen und deren Leistungselektronik. Die Bedienung der Anlage erfolgt über einen separaten Bedienterminal, welches sich hinter dem Strahlerraum befindet.

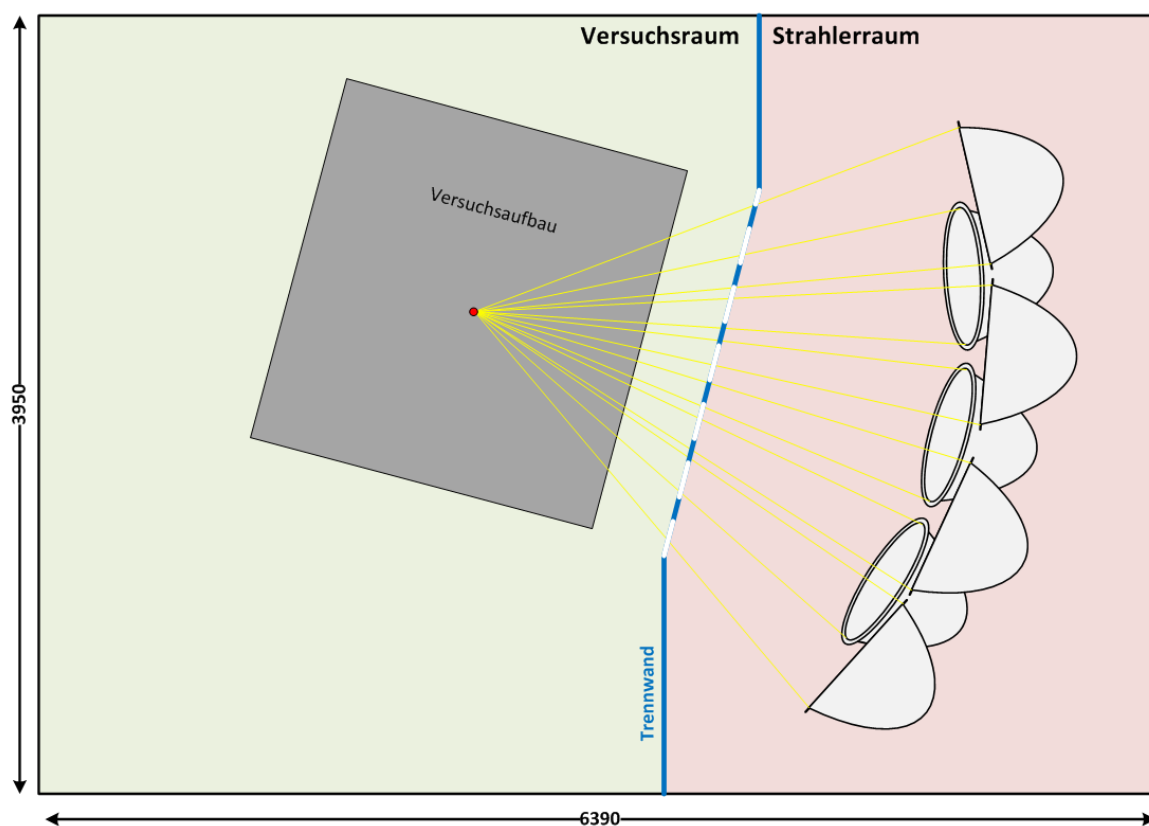
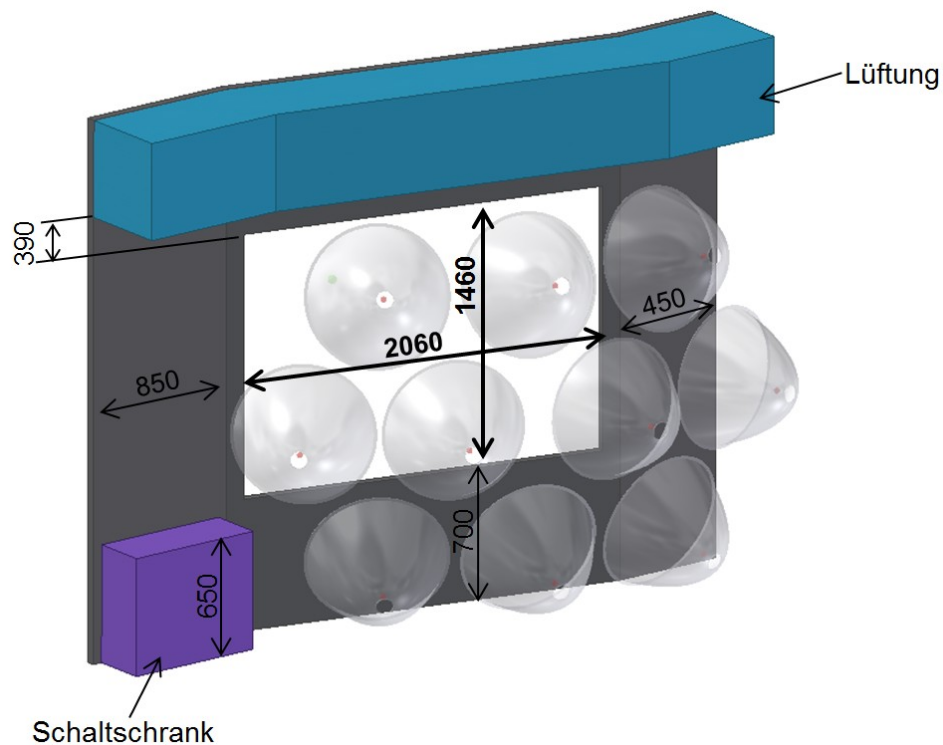


Abbildung 7 Querschnitt der Versuchseinrichtung „Hochleistungsstrahler“

Bei Betrieb des Strahlers kann eine Öffnung in der Trennwand durch ein Rolltor freigegeben werden. Die Trennwand dient als Schutzeinrichtung. Der Betriebsdruck der Lampen beträgt 100 bar. Im „kalten“ Zustand kann dieser immer noch 2-8 bar betragen. Hieraus resultiert ein hohes Gefahrenpotential, da die Lampen unter dem hohen Druck explodieren können. Das Betreten des Strahlerraums ist deshalb nur durch das Anlegen geeigneter Sicherheitskleidung erlaubt. Die Trennwand erlaubt somit das Aufbauen aufwendiger Versuchsaufbauten ohne Schutzkleidung. Die räumliche Begrenzung auf Seiten des Strahlerraums wird durch einen Schaltschrank und einer Lüftung eingeschränkt (siehe Abbildung 8).



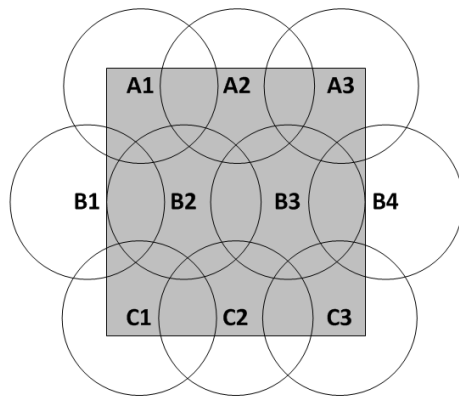
**Abbildung 8 Einfaches CAD-Modell der Trennwand auf Seiten des Strahlerraums; Abmaße in mm**

Bei der Entwicklung des Shutters steht der Raum zwischen der Trennwand und den Strahlern zur Verfügung. Die Vorrichtung darf nicht in den Versuchsraum hineinragen. Je nach Versuch nehmen die Versuchsaufbauten den Raum bis zur Trennwand vollständig ein.

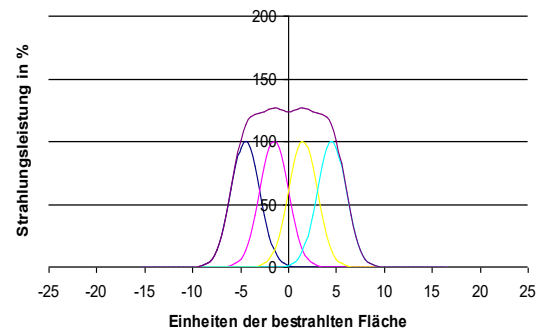
### 3.2 Flusssichtemessverfahren

Eine der wichtigsten Kenngrößen beim Betrieb des Hochleistungsstrahlers ist die Flusssichteverteilung. Die Flusssichteverteilung beschreibt die einfallende Strahlungsleistung bezogen auf eine Fläche. Im Falle der Xenon-Kurzbogenlampen und den eingesetzten Ellipsoidspiegeln beschreibt diese im Bereich des Targets eine flächige Gaußverteilung. Der Hochleistungsstrahler kann bis zu 10 Lampen zeitgleich betreiben. Im Betrieb ist eine gezielte Ausrichtung der einzelnen Lampen erforderlich. Vereinfacht kann angenommen werden, dass sich bei der Überlagerung der Flusssichteprofile der einzelnen Lampen auch die Gaußverteilungen überlagern.

Nahezu alle Experimente erfordern eine möglichst homogene Flächenverteilung. Hierzu werden die Brennpunkte der einzelnen Lampen versetzt zueinander ausgerichtet (siehe Abbildung 9). Die Überlagerung der Gaußverteilung ergibt das homogene Leistungsprofil (siehe Abbildung 10). Zur Überprüfung der vorhandenen Flusssichteverteilung ist eine Messtechnik erforderlich, welche im folgenden näher erläutert werden soll.



**Abbildung 9** Schema der versetzt ausgerichteten Lampen (verändert nach [3])



**Abbildung 10** Überlagerung der Gaußverteilungen zu einem homogenen Leistungsprofil [3]

Die Messung der Flussdichte kann nach verschiedenen Prinzipien erfolgen. Nachfolgend sollen zuerst die punktuellen Messverfahren und anschließend ein im eigenen Hause entwickeltes flächiges Messverfahren vorgestellt werden.

Zur punktuellen Messung stehen drei verschiedene Sensoren zur Verfügung: Die Radiometer Gardon und Kendall und das Kalorimeter Suncatch. Bei dem Gardon-Radiometer wird die einfallende Strahlung über eine mattschwarze Oberfläche nahezu vollständig absorbiert. Die mattschwarze Konstantanfolie ist dabei mit einem wassergekühlten Kupferdraht verbunden. Die Temperaturdifferenz erzeugt eine messbare Seebeck-Spannung zwischen den beiden elektrischen Leitern. Die Multiplikation der gemessenen Spannung mit einem Kalibrierfaktor ergibt die Flussdichte. Die Vorteile dieses Messverfahrens liegt in der schnellen Reaktionszeit. Von Nachteil ist die Vergleichsweise unpräzise Messung und die von Zeit zu Zeit benötigte neue Kalibrierung.

Nach einem ähnlichen Prinzip funktioniert das Kendall-Radiometer. Die einfallende Strahlung wird über eine kleine Blendenöffnung eingefangen. Der dahinterliegende Hohlraum ist mit einer Konstantanfolie versehen um die Strahlung zu absorbieren. Durch einen den Hohlraum umgebenen wassergekühlten Blendenkörper entsteht aufgrund der Temperaturdifferenz die Seebeck-Spannung. Im Vergleich zum Kendall-Radiometer ist dieses Verfahren sehr präzise benötigt jedoch auch deutlich mehr Zeit zur Aufnahme des Messwertes.

Die Basis des dritten Messverfahrens bildet der Satz der Energieerhaltung. Beim Suncatch-Kalorimeter fällt die Strahlung auf einen mattschwarzen wassergekühlten Kupferkonus. Als Messgröße dient die Temperaturerhöhung des Kühlwassers. Durch Berücksichtigung von Reflexions-, Konvektions- und Absorptionsverlusten, dem Einfluss der Kühlwasserreibung und den Abmaßen der Blende lässt sich schlussendlich die Flussdichte bestimmen [1].

Bezüglich Ansprechzeit und Messgenauigkeit positioniert sich das Suncatch-Kalorimeter zwischen den beiden Radiometern. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigt einen Messaufbau, welcher alle 3 Messprinzipien enthält.

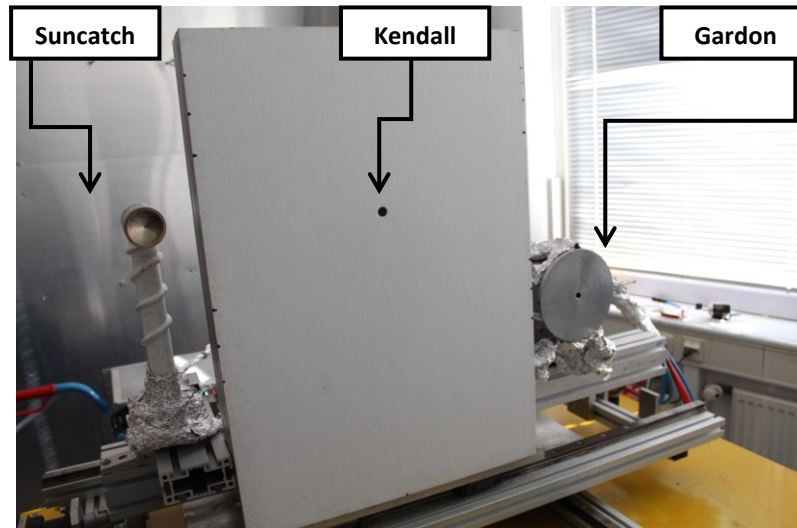


Abbildung 11 Messaufbau mit den 3 unterschiedlichen Sensoren zur Flussdichtemessung

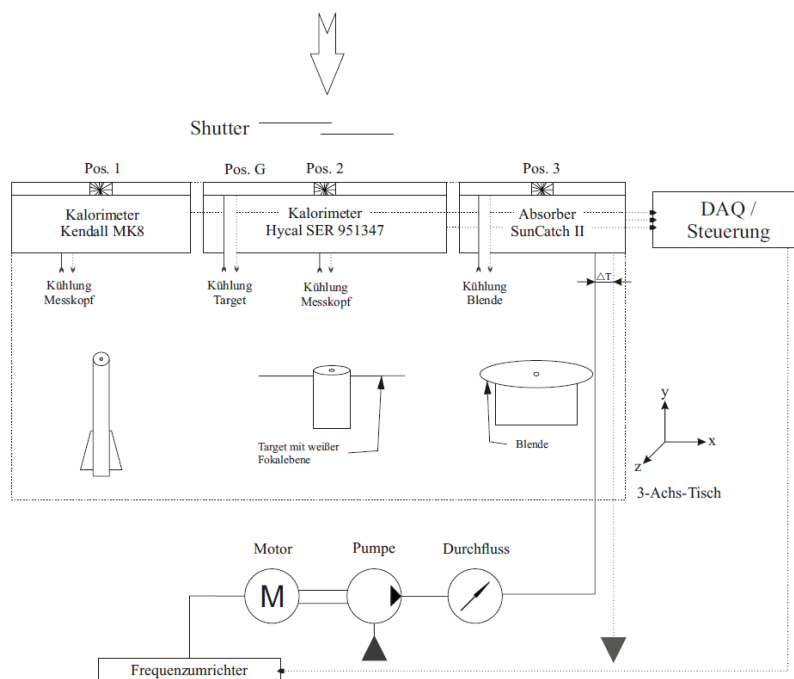


Abbildung 12 Verschaltung vom Messaufbau aus Abbildung 11 [1]

Die vorgestellten Messverfahren liefern lediglich die punktuelle Flussdichte an der Position des Sensors. Bei der Verwendung mehrerer Lampen ist wie bereits beschrieben eine homogene Verteilung der Leistung anzustreben. Bei der Ausrichtung der Lampen ist es von Vorteil die Flussdichteverteilung über eine gesamte Fläche aufzunehmen um die Überlagerung der

Gauß-Verteilungen abzuschätzen. Aus diesem Grund ist ein eigenes optisches Messverfahren entwickelt worden, bei dem die Flussdichteverteilung 2-dimensional ermittelt wird. Hierbei fällt die einfallende Strahlung auf eine weiße diffus reflektierende Oberfläche. Auf dieser Fläche befindet sich einer der zuvor vorgestellten punktuell messenden Sensoren. Eine Kamera nimmt die reflektierte Strahlung auf und gibt diese als Grauwertmatrix aus. Der Messwert des punktuellen Sensors dient als Referenzwert. Anhand der bekannten Flussdichte und dem Grauwert am gemessenen Punkt wird die Flussdichte auf den Bildausschnitt hochgerechnet (siehe Abbildung 13).

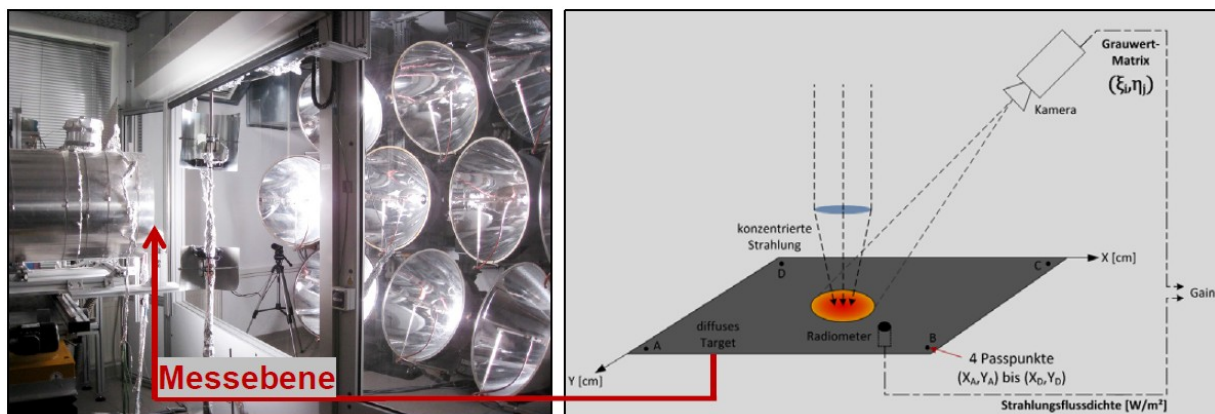


Abbildung 13 Messaufbau zur optischen Flussdichtemessung [1]

In der Ausgabedatei ist als Ergebnis die Verteilung der Flussdichte auf der zuvor definierten Fläche ersichtlich (siehe Abbildung 14).

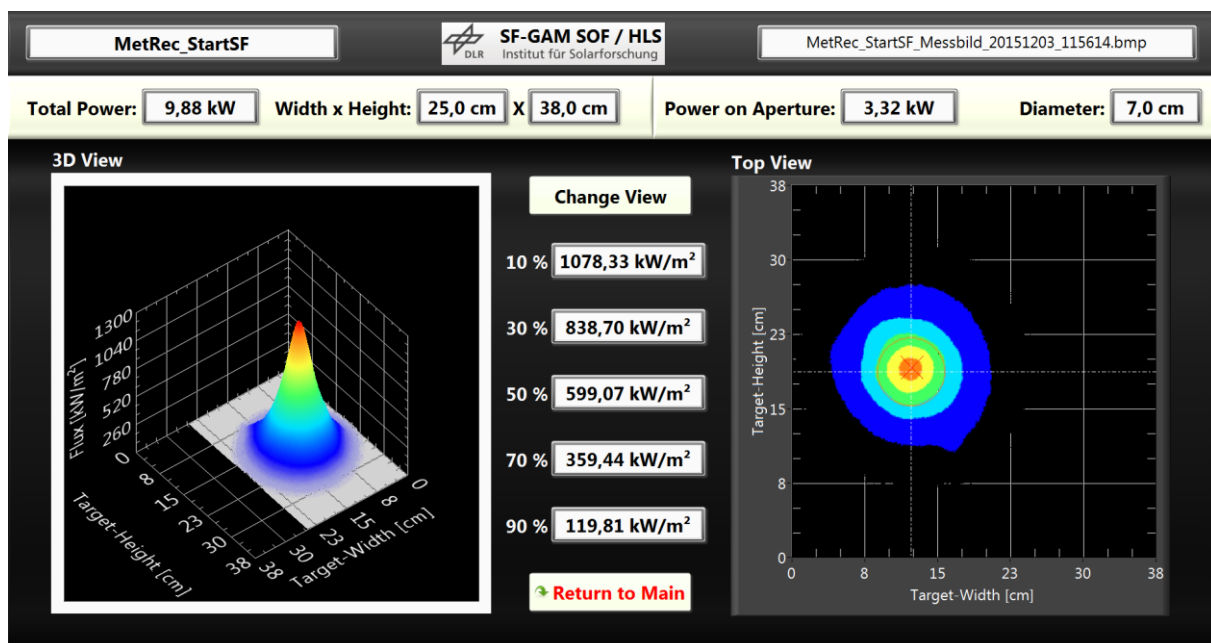


Abbildung 14 Ausgabe der optischen Flussdichtemessung; Betrieb mit den Lampen A2, B2, B3, C2 [1]

### 3.3 Eigenschaften eines Ellipsoids

Um zu verstehen, welchen Einfluss die Form der Abschattung auf die zu erwartenden Ergebnisse hat, sollen die Strahlungseigenschaften eines Ellipsoids näher erläutert werden. Eine Ellipse weist zwei Brennpunkte auf. Wird eine Lichtquelle im Brennpunkt F1 positioniert, wird die Strahlung über die elliptisch geformte Fläche des Ellipsoidspiegels in den Brennpunkt F2 reflektiert (siehe Abbildung 15). Im Falle des Hochleistungsstrahlers ist die Form des Ellipsoidspiegels derart gewählt worden, dass der Abstand zwischen den beiden Brennpunkten F1 und F2 exakt 3m beträgt (siehe Abbildung 16).

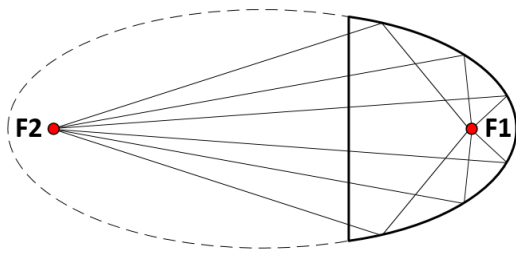


Abbildung 15 Strahlungseigenschaften eines Ellipsoid [4]

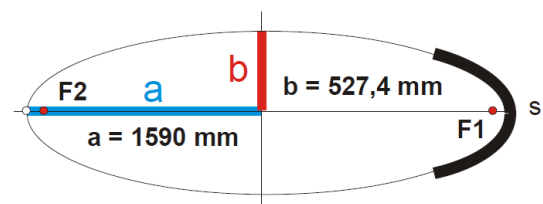


Abbildung 16 Abmaße der Ellipse zum Ellipsoidspiegels im HLS [1]

Die theoretische Betrachtung geht dabei von einer punktförmigen Lichtquelle aus. In der Praxis ist von einer räumlich ausgedehnten Lichtquelle auszugehen, sodass der größte Teil der Lichtquelle sich nicht im Fokus, sondern um diesen herum befindet. Um zu untersuchen welcher Einfluss hierdurch auf die Reflektionen entsteht, soll mit dem Simulationstool OptiCad® ein Modell eines Ellipsoidspiegels erstellt werden. OptiCad® dient der Berechnung von Strahlungsprofilen. Dabei wird von einer geometrischen Ausbreitung der Lichtstrahlen ausgegangen. Die Vorlage des Modells bildet ein von den Maßen identischer Ellipsoidspiegel wie im HLS.

Der Vollständigkeit halber wird im ersten Berechnungsmodell von einer punktförmigen Lichtquelle ausgegangen. Die reflektierten Lichtstrahlen des Ellipsoidspiegels treffen wie zu erwarten im Abstand von 3m im Brennpunkt F2 zusammen (siehe Abbildung 17).

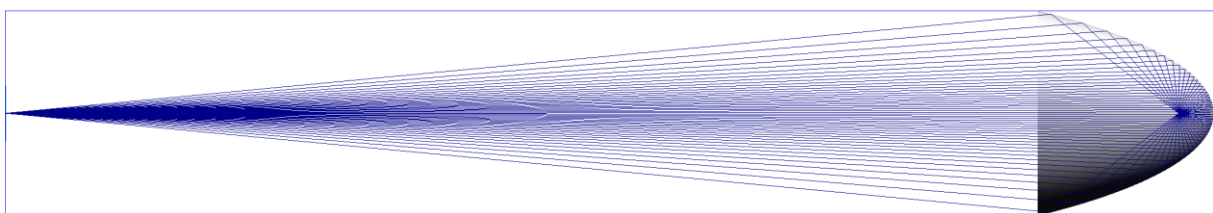
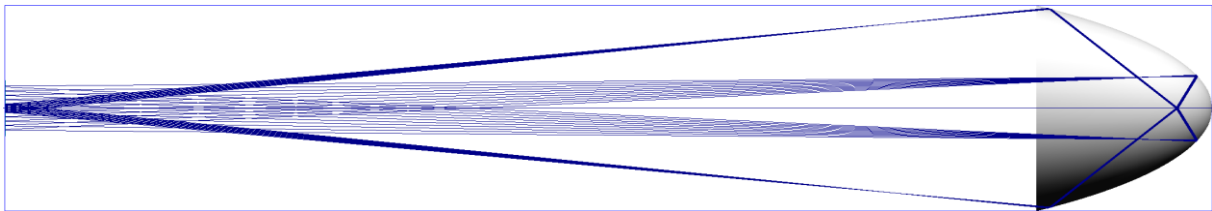


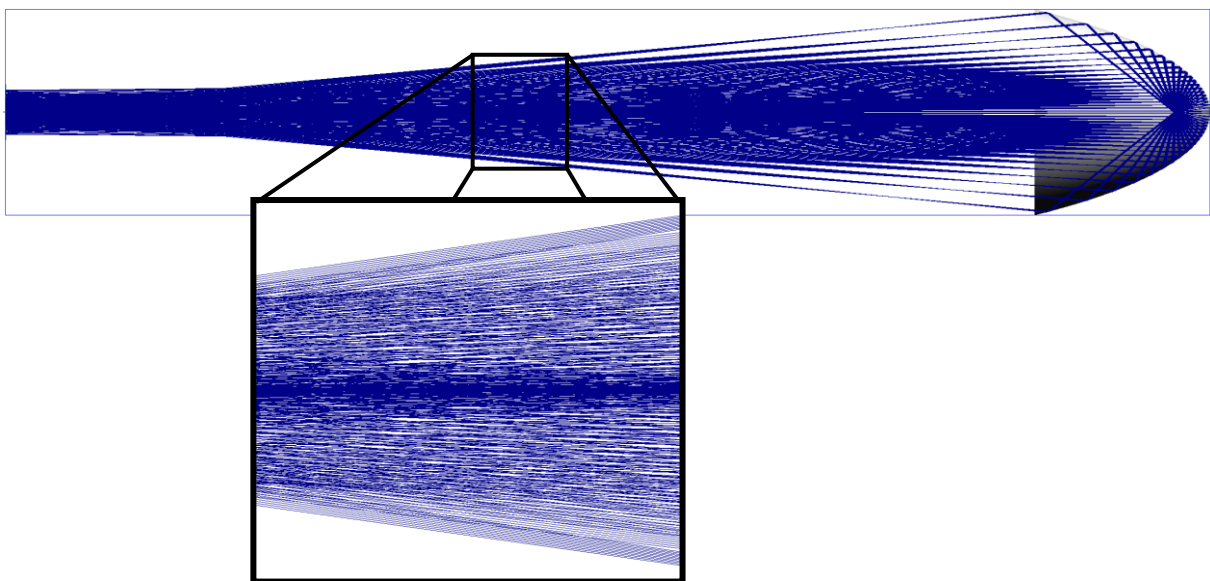
Abbildung 17 Simulationsergebnisse eines Ellipsoids mit einer punktförmigen Lichtquelle im Fokus F1

Im zweiten Berechnungsmodell wird keine punktförmige Lichtquelle, sondern eine linienförmige Lichtquelle mit einer Länge von 10mm gewählt. Dies entspricht in etwa der Länge des Lichtbogens in den verbauten Xenon-Kurzbogenlampen. Im ersten Schritt wird die Berechnung mit einer begrenzten Anzahl von Lichtstrahlen durchgeführt (siehe Abbildung 18). Es zeigt sich, dass die Lichtstrahlen, die näher an der Rotationsachse des Ellipsoids reflektiert werden, auf Höhe des Brennpunktes F2 stärker gestreut werden. Je weiter die Lichtstrahlen an der Außenbahn des Ellipsoids nach außen wandern, desto stärker findet eine Bündelung der Lichtstrahlen im Brennpunkt F2 statt. Hieraus lässt sich die Annahme ableiten, dass bei einer Abschattung der Ellipsoidspiegel von außen nach innen zunächst die Strahlungsintensität im Zentrum der angestrahlten „Target“-Fläche abnimmt.



**Abbildung 18** Simulationsergebnisse eines Ellipsoides mit einer linienförmigen Lichtquelle im Fokus (geringe Anzahl an Strahlen)

Im zweiten Berechnungsschritt wird die Anzahl der Lichtstrahlen deutlich erhöht (siehe Abbildung 19). Die Vergrößerung eines Ausschnitts zwischen den beiden Brennpunkten zeigt, dass die Strahlendichte von außen nach innen deutlich zunimmt. Daraus lässt sich schließen, dass die Strahlungsintensität ebenfalls von außen nach innen deutlich zunimmt.



**Abbildung 19** Simulationsergebnisse eines Ellipsoides mit einer linienförmigen Lichtquelle im Fokus (hohe Anzahl an Strahlen)



Wird von einem Shutterdesign ausgegangen, welches die einfallende Strahlung von außen nach innen begrenzt, lässt sich aus den Simulationsergebnissen ableiten, dass beim Abblenden der reflektierenden Ellipsoidstrahlung von außen nach innen zunächst nur der Peak des Strahlungsprofils abgeschwächt wird. Die Strahlungsintensität nimmt gleichzeitig zu, sodass der Großteil der Energie nicht homogen ausgeblendet wird.

Im nächsten Schritt soll eine Vorabbetrachtung bezüglich der Form des Shutters stattfinden. Bei der bisherigen Betrachtung ist von einer einzelnen Lampe ausgegangen worden. Jetzt wird ein Simulationsmodell des Hochleistungsstrahlers mit 10 Lampen in der OPTICAD-Umgebung erstellt. Es werden 2 unterschiedliche inhomogene Abblendungen untersucht. Das erste Modell hat als Öffnung eine rechteckige Form dessen Breite schrittweise verkleinert wird. Das zweite Modell weist eine kreisförmige Öffnung auf, dessen Durchmesser schrittweise verkleinert wird. Die beiden Öffnungen werden auf Höhe der Trennwand platziert. Die abgeschwächte Strahlung wird im Brennpunkt gemessen.

Anders als bei der homogenen Abschottung, bei der die einfallende Strahlung gleichmäßig abgeschwächt wird, werden bei den hier untersuchten Varianten die Strahlenkegel nacheinander ausgeblendet. Es ist zu erwarten, dass eine homogene Abschottung zu besseren Ergebnissen führt, diese ist jedoch schwerer technisch zu realisieren. Eine inhomogene Abschottung eines kleiner werdenden Ausschnitts ist hingegen technisch einfacher zu realisieren. Ziel der Berechnung ist es, die Möglichkeit einer inhomogenen Abschottung und deren Einsatzmöglichkeit zu prüfen.

Die Ergebnisse der rechteckigen Öffnung (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2) zeigen einen größtenteils gleichmäßigen Leistungsabfall. Bis zu einer Shutteröffnung von 78% ist zunächst nur ein geringer Leistungsabfall zu verzeichnen. Die ist aufgrund der geringeren Strahlungsintensität im äußeren Strahlenkegel zu erwarten (siehe Abbildung 19). Im weiteren Verlauf nimmt der Leistungsabfall leicht zu, da nun auch das energiereiche Innere des Strahlenkegels ausgeblendet wird. Bis zu einer Shutteröffnung von 5% ist der Leistungsabfall relativ gleichmäßig.

Die Ergebnisse der kreisförmigen Öffnung (siehe Tabelle 3 und Tabelle 4) zeigt vor allem bis zu einer Shutteröffnung von 55% eine deutlich stärkere Abschwächung (siehe Abbildung 20). Dies erklärt sich durch die gleichzeitige Ausblendung der jeweils drei äußeren linken und rechten Lichtkegel. Dies ist der Anordnung der Lampen geschuldet.



Negative Auswirkungen auf das Flussdichteprofil bei inhomogener Abschottung sind grundsätzlich bei beiden Varianten nicht ersichtlich.

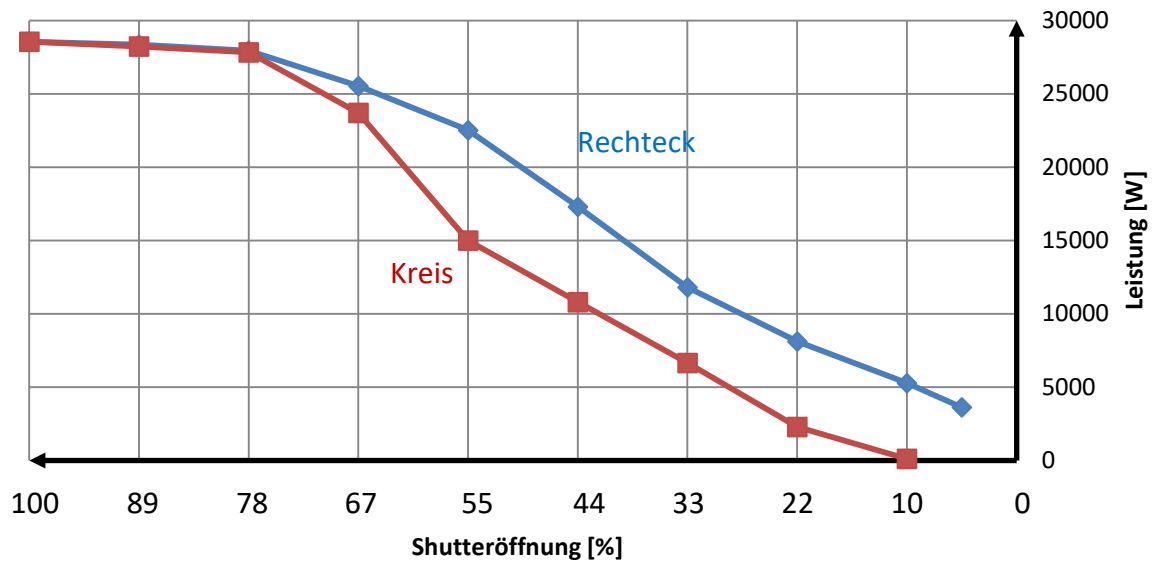


Abbildung 20 Vergleich des Leistungsabfalls bei einer sich schließenden rechteckigen und kreisförmigen Öffnung

Tabelle 1 Ergebnisse aus der Simulation einer rechteckigen Öffnung

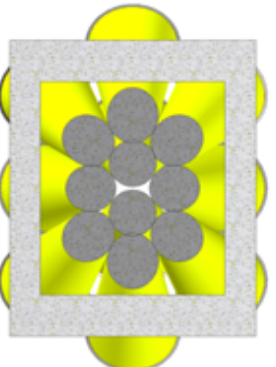
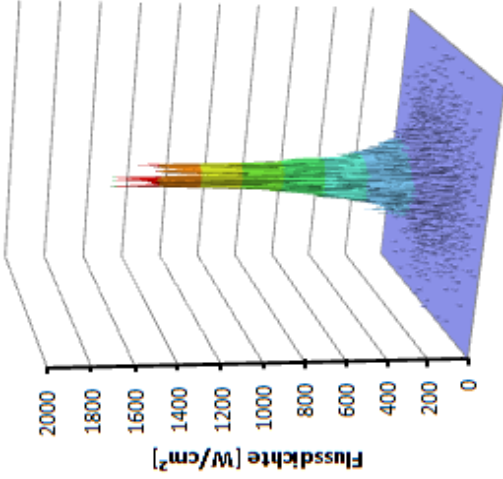
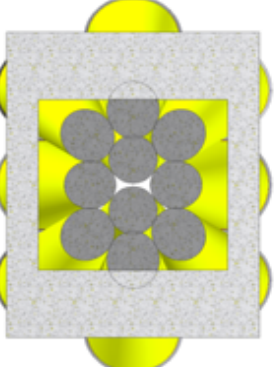
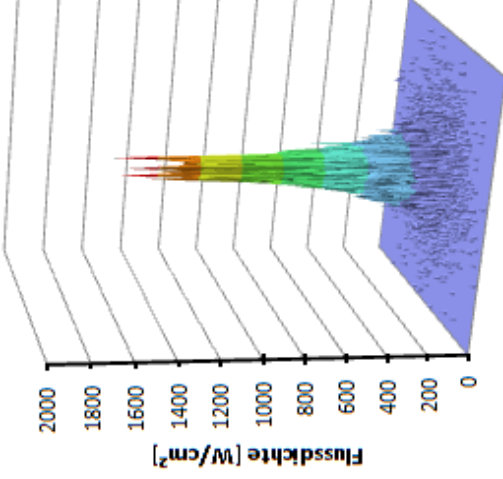
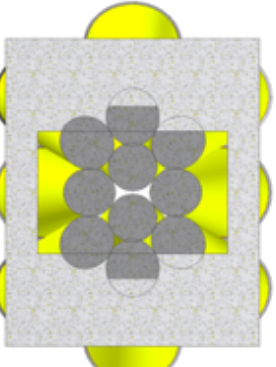
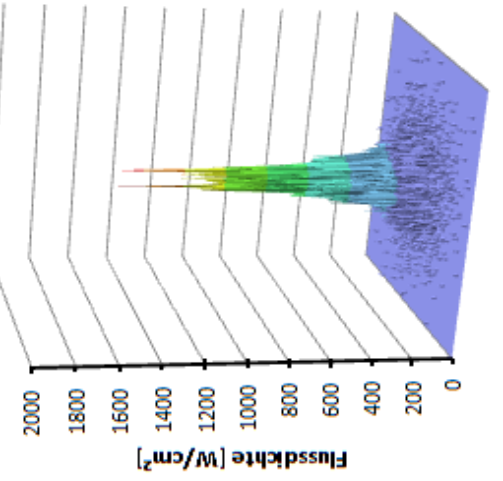
Shutteröffnung 100%		 <p><math>P_{\text{total}} = 28,5 \text{ kW}</math></p>
Shutteröffnung 78%		 <p><math>P_{\text{total}} = 28 \text{ kW}</math></p>
Shutteröffnung 55%		 <p><math>P_{\text{total}} = 22,5 \text{ kW}</math></p>

Tabelle 2 Fortsetzung von Tabelle 1

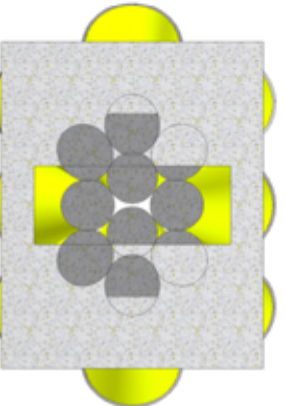
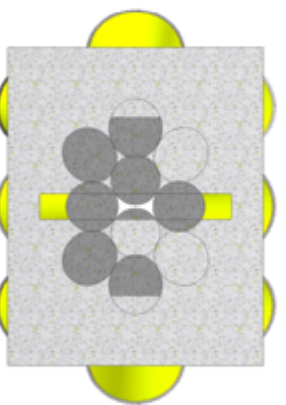
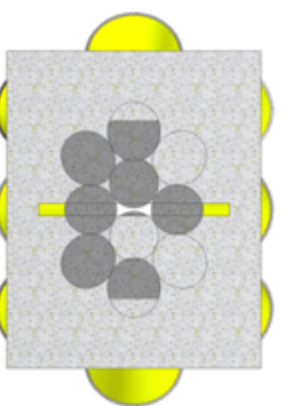
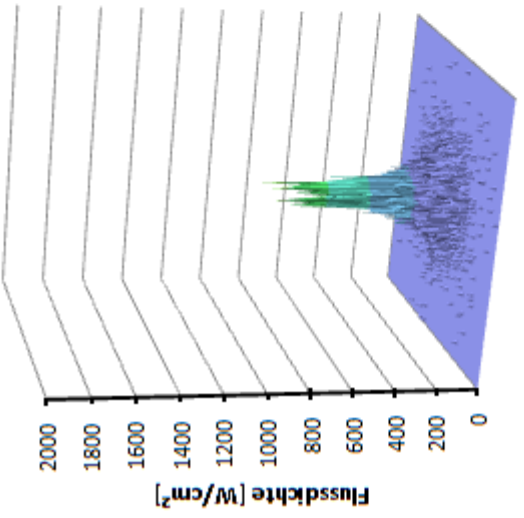
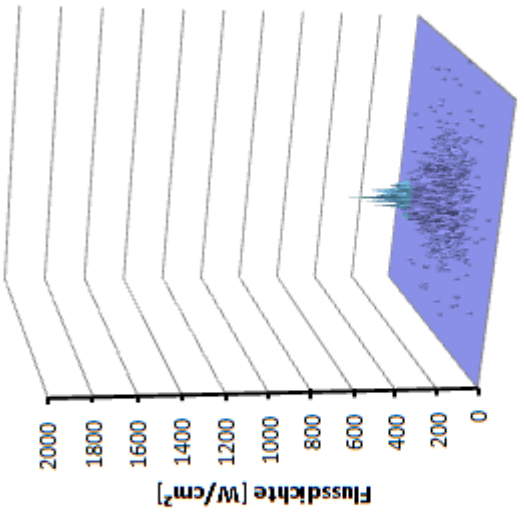
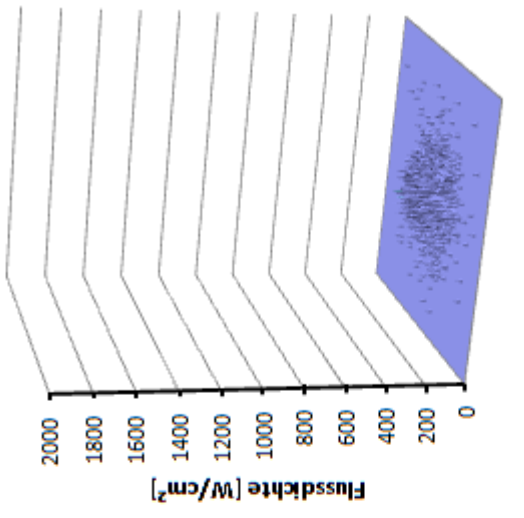
Shutteröffnung 33%	Shutteröffnung 10%	Shutteröffnung 5%
		
 <p><math>P_{\text{total}}=17,3\text{kW}</math></p>	 <p><math>P_{\text{total}}=5,3\text{kW}</math></p>	 <p><math>P_{\text{total}}=3,6\text{kW}</math></p>

Tabelle 3 Ergebnisse aus der Simulation mit einer kreisförmigen Öffnung

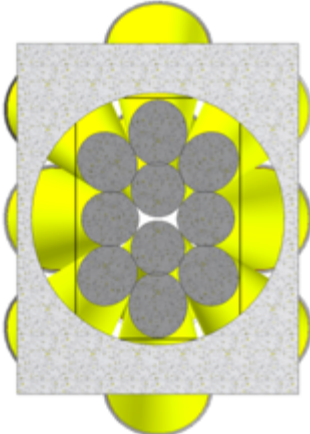
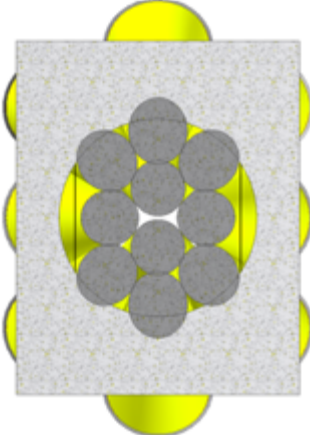
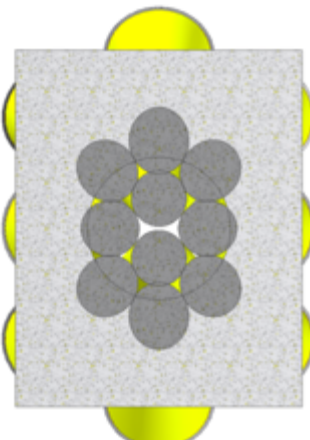
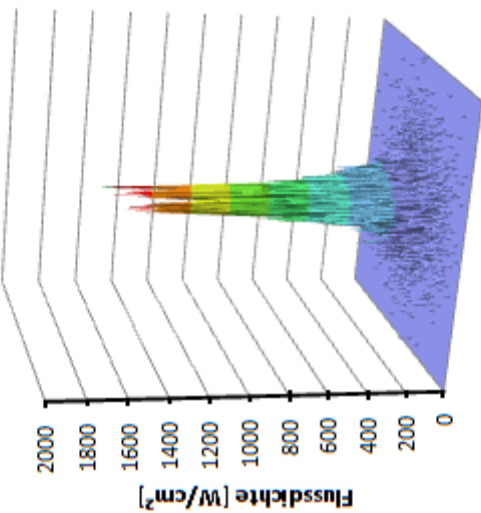
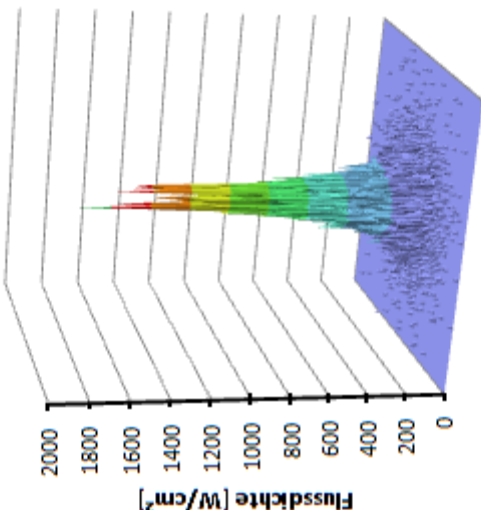
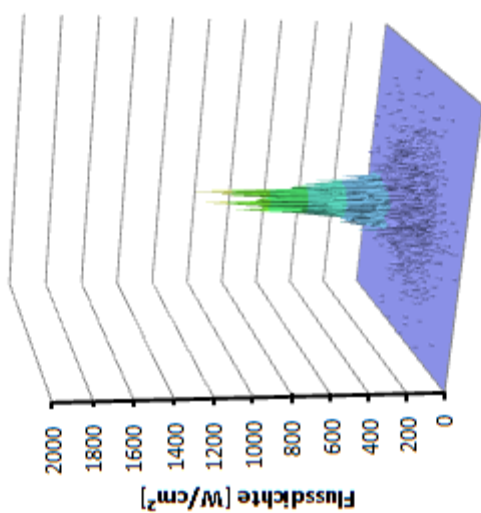
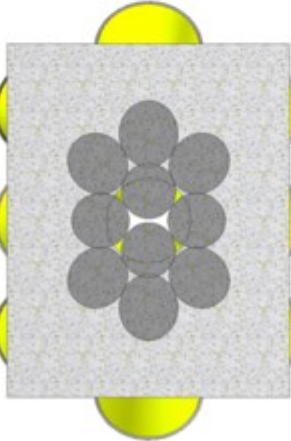
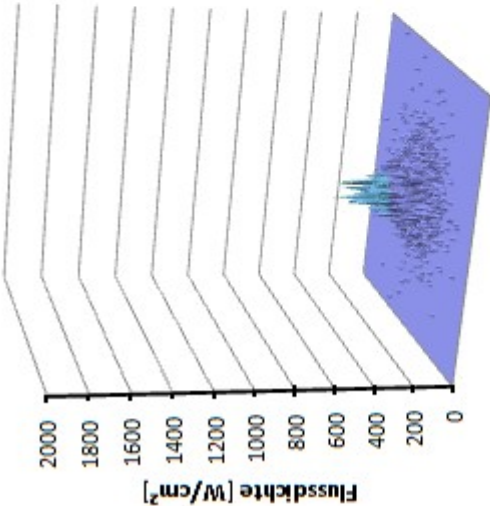
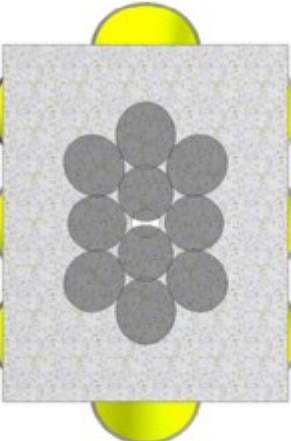
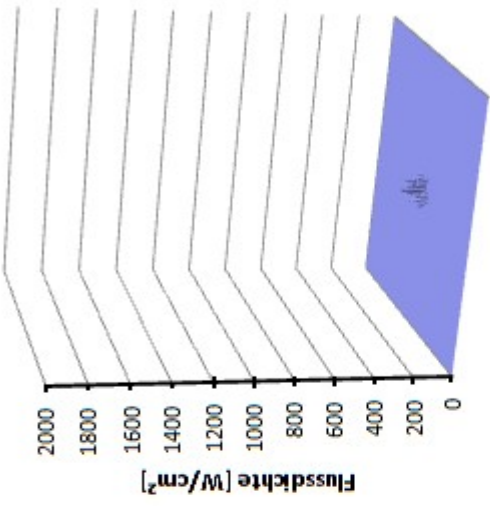
Shutteröffnung 100%	Shutteröffnung 78%	Shutteröffnung 55%
		
 <p><math>P_{\text{total}} = 28,5 \text{ kW}</math></p>	 <p><math>P_{\text{total}} = 27,8 \text{ kW}</math></p>	 <p><math>P_{\text{total}} = 15 \text{ kW}</math></p>

Tabelle 4 Fortsetzung von Tabelle 3

Shutteröffnung 33%		 <p><math>P_{\text{total}}=6,6\text{ kW}</math></p>
Shutteröffnung 10%		 <p><math>P_{\text{total}}=0,1\text{ kW}</math></p>



## 4 Designauswahl

Zur Ermittlung des optimalen Designs werden im ersten Schritt die bisherigen Shutterssysteme, welche im Einsatz waren oder im Einsatz sind analysiert. Anschließend wird eine Recherche bezüglich Patenten, Lösungen aus anderen Technikbereichen und Shutterssysteme von anderen Hochleistungsstrahlern durchgeführt. Die gesammelten Lösungsansätze werden in einem morphologischen Kasten zusammengefasst und durch weitere Ansätze ergänzt. Daraufhin werden vier ausgewählte Konzepte herausgearbeitet und abschließend im Rahmen einer Nutzwertanalyse bewertet.

### 4.1 Bisherige Shutterssysteme im Vergleich

#### Lamellenshutter:

Ein bisher am HLS im Einsatz gewesenes Shutterssystem wird als Lamellenshutter bezeichnet. Hierbei sind mehrere wassergekühlte Lamellen vertikal angeordnet. Durch drehen der Lamellen kann der Strahlungsdurchtritt reguliert werden. Beim asymmetrischen Lamellenshutter drehen sich die einzelnen Lamellen in dieselbe Richtung (siehe Abbildung 21). Zur gleichmäßigeren Abschottung ist in einer Weiterentwicklung ein symmetrischer Lamellenshutter entwickelt worden, bei dem sich die Lamellen um die vertikale Symmetrieachse gespiegelt drehen (Abbildung 22). Der Vorteil der homogenen Abschottung bringt jedoch einen aufwändigeren Antrieb als Nachteil mit sich, da sich die Lamellen nicht wie zuvor über einen umlaufenden Seilzug betreiben lassen. Im Betriebsfall hat sich gezeigt, dass sich die Lamellen aufgrund der thermischen Belastung verklemmen und somit vermehrt Störungen im Betrieb aufgetreten sind.



Abbildung 21 Asymmetrischer Lamellenshutter [1]



Abbildung 22 Symmetrischer Lamellenshutter im Hochleistungsstrahler [1]

### Gateau-Shutter:

Für den Sonnenofen ist ein weiteres Shutterssystem unter dem Namen Gateau-Shutter entwickelt worden. Dieser besteht aus 8 dreieckigen Lamellen, welche im geschlossenen Zustand bündig zusammenlaufen (siehe Abbildung 23). Durch das Aufklappen der einzelnen Lamellen kann der Strahleneintritt reguliert werden (siehe Abbildung 24). Die Abmaße des Gateau-Shutters sind so gewählt, dass dieser näher am Fokus positioniert werden muss. Im Falle des HLS, bei dem die Anforderung gilt, den Shutter im Ausschnitt zu positionieren, wäre demnach eine vergrößerte Version erforderlich.

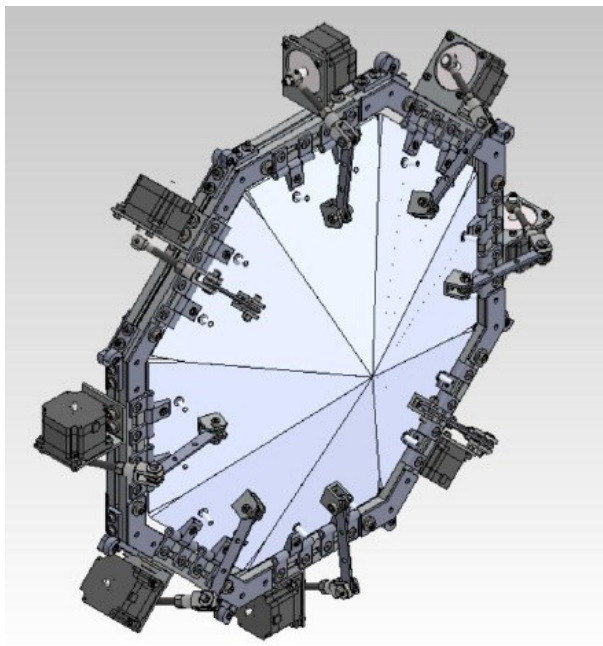


Abbildung 23 Gateau-Shutter [5]

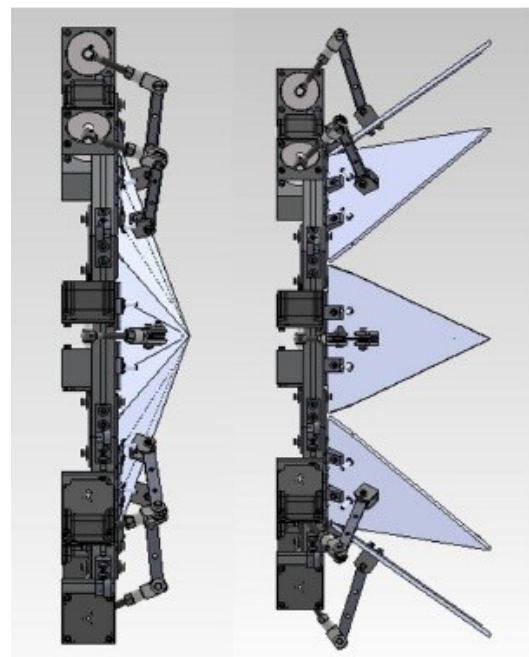
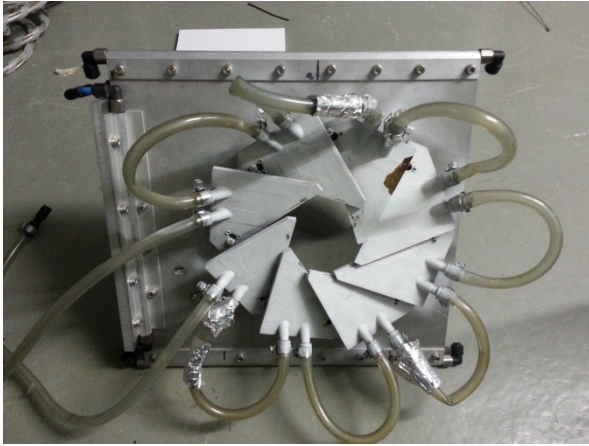


Abbildung 24 Öffnungsmechanismus des Gateau-Shutters [5]

### Iris-Shutter:

Ein Shutterssystem, welches unter anderem zur Abblendung in derameratechnik verwendet wird, ist der sogenannte Iris-Shutter. Ein solches System wurde ebenfalls im Rahmen einer Vorentwicklung am Sonnenofen getestet. Dieser Shutter besteht aus 8 wassergekühlten Lamellen, welche drehbar gelagert sind (siehe Abbildung 25). Der Antrieb der Lamellen erfolgt rückseitig über einen umlaufenden Kettentrieb (siehe Abbildung 26). Durch simultanes Drehen aller Lamellen kann die Durchtrittsfläche im Zentrum reguliert werden. Während des Betriebes konnte ähnlich wie beim Gateau-Shutter keine ausreichende Betriebssicherheit gewährleistet werden. Die thermische Belastung hat zum Verklemmen der Mechanik geführt.



**Abbildung 25 Iris-Shutter in der Frontansicht**



**Abbildung 26 Iris-Shutter in der Rückansicht**

### 2 Plattenshutter:

Der aktuell am Sonnenofen eingesetzte Shutter besteht aus 2 vertikal verschiebbaren Platten, welche ca. 1 m vor dem Brennpunkt positioniert sind (siehe Abbildung 27). Durch das Verschieben der Platten kann die einfallende Strahlung reguliert werden. Dieses System ist ohne Kühlung funktionsfähig und bereits seit mehreren Jahren am Sonnenofen im Einsatz.



**Abbildung 27 2-Plattenshutter am Sonnenofen [1]**



## 4.2 Recherche

### 4.2.1 Konkurrenz

Eine Recherche nach Shutterssystemen von externen Hochleistungsstrahlern und Sonnenöfen ergab, dass hier vor allem Lamellenshutter eingesetzt werden. Der Lamellenshutter der „Universidad Nacional Autónoma de México“ verwendet vertikal angeordnete Lamellen (siehe Abbildung 28) [6]. Der Lamellenshutter der Anlage „SF-60“ in Almeriá verwendet horizontal angeordnete Lamellen zur Regulierung der einfallenden Strahlung (siehe Abbildung 29) [7].



Abbildung 28 Lamellenshutter des HFSF an der CIE-UNAM in Temixco [6]



Abbildung 29 Lamellenshutter des SF-60 in Almeria [7]

Bei externen Hochleistungsstrahlern werden ebenfalls Lamellenshutter eingesetzt. Beim Lamellenshutter des Paul-Scherer Instituts sind die Lamellen auf einer kreisförmigen Bahn angeordnet (siehe Abbildung 30) [1]. Der Shutter des HFSS Kiran-42 verwendet horizontale Lamellen in einer trapezförmigen Anordnung (siehe Abbildung 31) [8]. Es kann angenommen werden, dass diese Anordnungen zur Verbesserung des Strahlungsprofils führt.



Abbildung 30 Lamellenshutter des HFSS am Paul Scherer Institut [1]



Abbildung 31 Lamellenshutter des HFSS KIRAN-42 [8]

### 4.2.2 Lösungen aus anderen Technikbereichen

Im Bereich der Röntgenstrahlung werden ebenfalls Shutter verwendet. Ähnlich des 2-Plattenshutters am Sonnenofen gibt es Lösungsansätze, welche 2 überlagerte Plattenshutter verwenden, wodurch sich bei gegenläufiger Bewegung der einzelnen Platten variable rechteckige Öffnungsprofile einstellen lassen (siehe Abbildung 32) [9]. Nach diesem Prinzip sind mehrere Patente zu finden, welche verschiedene Mechaniken zur Kopplung der 4 Platten enthalten (Beispiel siehe Abbildung 33) [10].

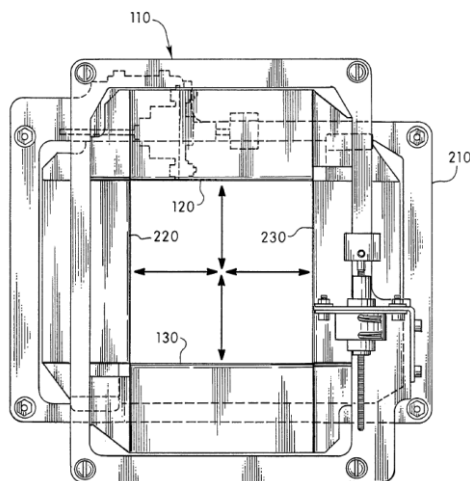


Abbildung 32 Abblendvorrichtung für Röntgenstrahlung [9]

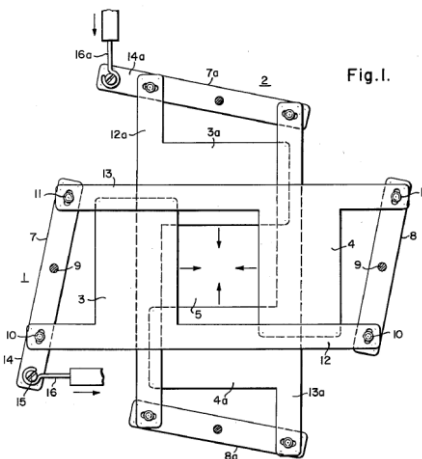


Abbildung 33 Abblendvorrichtung für Röntgenstrahlung [10]

Nach einem ähnlichen Wirkprinzip gibt es Systeme, welche wiederum aus gegeneinander beweglichen Platten mit entsprechender Profilierung bestehen. Durch entsprechende Aussparungen in den Platten können verschiedene Öffnungsprofile gewählt werden (siehe Abbildung 34 und Abbildung 35) [11] [12].

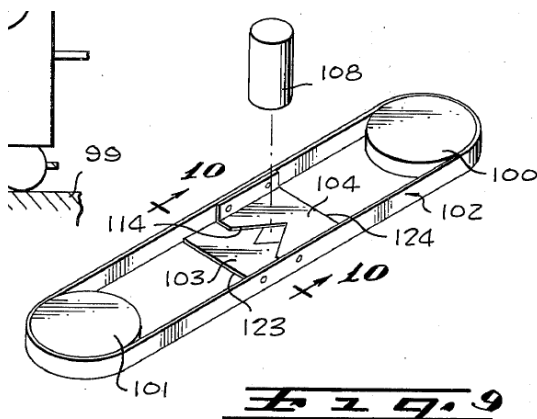


Abbildung 34 Bewegungsprinzip eines Plattenshutters [11]

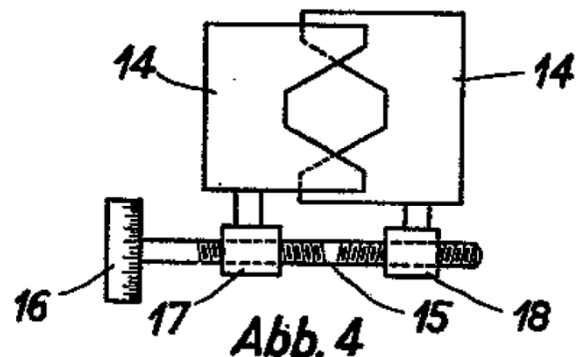


Abbildung 35 Regelbare Blende [12]

Wie bereits erwähnt werden in der Fotografie sogenannte IRIS-Shutter verwendet. Hierbei ist zwischen 2 verschiedenen Mechaniken zu unterscheiden. Der IRIS-Shutter kann aus mehreren drehbar gelagerten Lamellen bestehen. Über einen in einer Nut geführten Mitnehmer auf jeder Lamelle kann durch eine Drehbewegung des beweglichen Gehäuseteils ein aufdrehen aller Lamellen eingeleitet werden. Hierdurch öffnet oder schließt sich eine annähernd kreisrunde Öffnung im Zentrum (siehe Abbildung 36) [13]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Lamellen nicht zu drehen sondern linear zu bewegen (siehe Abbildung 37) [14]. Die Lamellen können beispielsweise über einen umlaufenden Seilzug miteinander gekoppelt werden.

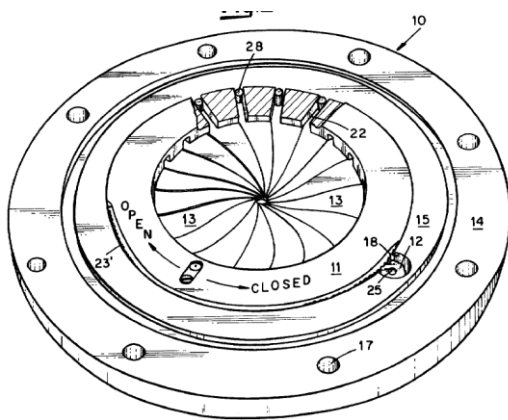


Abbildung 36 Irisshutter mit Drehelementen [13]

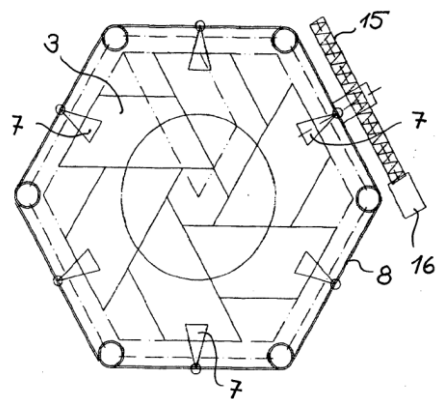


Abbildung 37 Irisshutter mit Schiebeelementen [14]

Im Bereich der Fassadenverschattung werden ebenfalls verschiedene Systeme zur Abschattung des Sonnenlichtes verwendet. Neben herkömmlichen Jalousien werden Faltschiebeläden (siehe Abbildung 38) [15] und Faltscherenläden (siehe Abbildung 39) [16] verwendet.

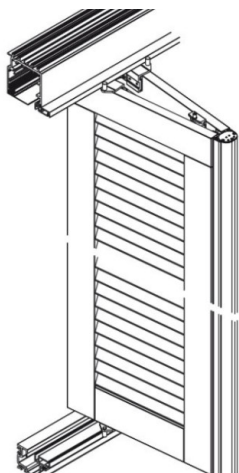


Abbildung 38 Faltschiebeläden [15]

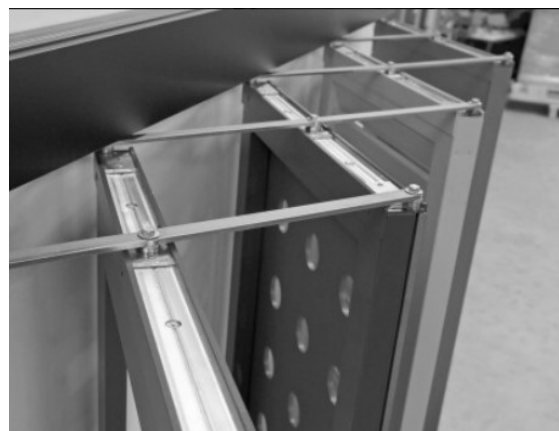
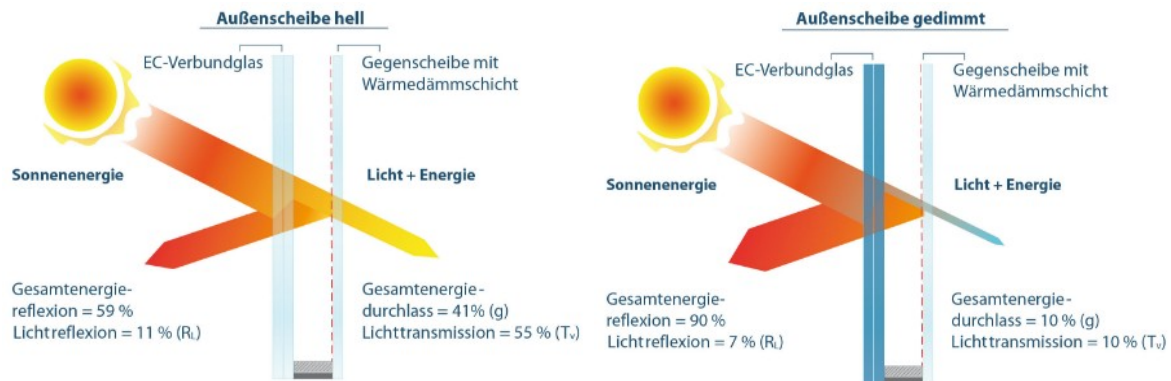


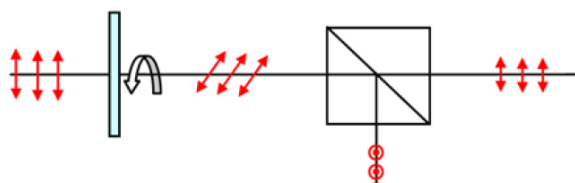
Abbildung 39 Faltscherenläden [16]

Ebenfalls aus dem Bereich der Fassadenverschattung bekannt sind sogenannte elektrochrome Gläser. Diese ermöglichen eine einstellbare Helligkeit des Glases welche wiederum den Lichtdurchlass beeinflusst (siehe Abbildung 40) [17].



**Abbildung 40 Funktionsprinzip elektrochromer Gläser [17]**

Aus dem Bereich der Lasertechnik sind ebenfalls Shattersysteme bekannt, welche die Intensität der Laserstrahlung regulieren. Es werden verschieden Konzepte verwendet. Eine Möglichkeit besteht darin, die Polarisierung des Laserstrahls durch eine sogenannte Verzögerungsplatte einzustellen. Ein dahinter liegender Polarisator kann somit den Durchlass abhängig vom Rotationswinkel der Verzögerungsplatte variieren (siehe Abbildung 41) [18]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen sogenannten dielektrischen Spezialspiegel zu verwenden. Dieser reflektiert bzw. transmittiert je nach Einfallswinkel die einfallende Strahlung (siehe Abbildung 42) [18].



**Abbildung 41 Schema eines variablen Abschwächers bestehend aus einer Verzögerungsplatte und eines Polarisators [18]**



**Abbildung 42 Schema eines dielektrischen Spezialspiegels [18]**

### 4.3 Morphologischer Kasten

Die vorgestellten Lösungsansätze werden im Folgenden in einem morphologischen Kasten zusammengefasst. Zur Auswahl stehen 5 unterschiedliche Merkmale:

**Funktionsprinzip:**

Unter diesem Punkt versteht sich das zugrundeliegende Prinzip der Abblendung. Zur Auswahl stehen eine physische Abtrennung der Strahlung, worunter das Ausblenden einer Strahlung durch einen lichtundurchlässigen Gegenstand verstanden wird, und die bereits in der Recherche vorgestellten Ansätze eines elektrochromen Glases und der Abschwächer aus der Lasertechnik. Neu hinzugefügt ist der Ansatz, die Strahlung der Ellipsoidspiegel durch eine Linse vorab zu bündeln, mit dem Ziel die abzublenkende Fläche zu verkleinern.

**Ort:**

Der Ort beschreibt die Platzierung des Shutters. Hier besteht die Möglichkeit, den Shutter in der bereits vorhandenen Trennwand, vor den einzelnen Ellipsoidspiegel oder im Bereich dazwischen zu platzieren. Eine Platzierung des Shutters vor die Trennwand ist den Anforderungen nach nicht erlaubt.

**Mechanismus:**

Basierend auf dem Funktionsprinzip sind hier verschiedene Möglichkeiten aufgelistet dieses umzusetzen. Die meisten Mechanismen sind auf das Funktionsprinzip der physischen Trennung zurückzuführen. Neben einfachen Schiebe- oder Drehtürelementen sind ebenfalls die Ansätze aus dem Kapitel Recherche aufgezeigt, wie z.B. die Möglichkeit einer Faltschirm oder eines Iris-Shutters. Neu hinzugefügte Ansätze sind der Teleskopshutter, bei dem eine Unterteilung der Türelemente in mehrere Kleinere erfolgt um Bauraum einzusparen, ein partieller „Vorhang“, bei dem die Lamellen auf die Breite eines Strahlenkegels ausgelegt werden um somit nur die aktiven Strahler auszublenken.

**Anzahl der Lamellen:**

Definiert die Anzahl der Lamellen eines Shutters.

**Anordnung:**

Definiert, falls gegeben, die Anordnung der Lamellen.

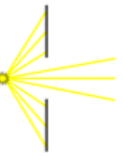
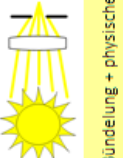
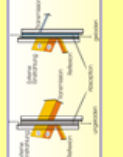
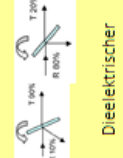
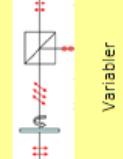


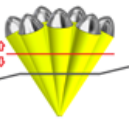
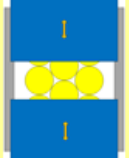
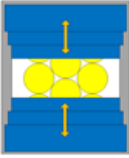

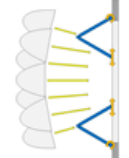
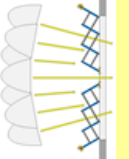

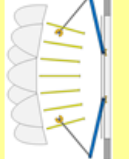
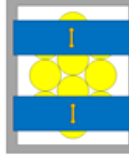

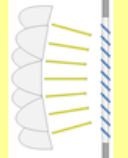
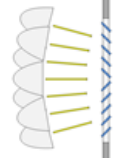
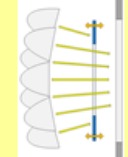


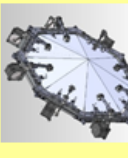


Ausprägung									
Merkmal									
Funktions- prinzip	 Physische Trennung	 Bündelung + physische Trennung	 Elektrochromes Glas	 Dielektrischer Spezialspiegel	 Variabler Abschwächer				
Ort	 Trennwand	 Ellipsoidspiegel	 Variabel						
Mechanismus	 Schiebetür	 Teleskop	 bewegliche Lochblende	 Faltlamelle	 Faltschere Lamelle	 Drehtür	 Schwenktür	 partieller Vorhang	 Doppelter Vorhang
	 unsymmetrisch	 symmetrisch	 Iris-Shutter	 Schwenkelemente	 Schiebeelemente	 Gateau-Shutter	 Scheibe	 Fassaden- verschattung	
	1	2	3	4	5	6	7	8....	keine
	Vertikal	Horizontal							Nicht erforderlich

Abbildung 43 Morphologischer Kasten

## 4.4 Vorbewertung der Lösungsvarianten

Die im morphologischen Kasten gelb hinterlegten Feldern haben sich als nicht geeignet herausgestellt.

Bei den Funktionsprinzipien ist lediglich die physische Trennung umsetzbar. Eine Bündelung durch eine Linse ist neben den zu hohen zu erwartenden Kosten aufgrund der hohen Energieaufnahme der Linse selbst nicht möglich. Die Eigenschaften elektrochromer Gläser entsprechen nicht den Anforderungen, die an den Shutter gestellt werden. Die Schaltzeit solcher Gläser beläuft sich auf 20 Minuten und die transmittierte Strahlung kann lediglich in einem Regelbereich von 15-55% eingestellt werden. Die in der Lasertechnik eingesetzten Shutter sind darauf ausgelegt, die Intensität der Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich zu regulieren. Im Falle der Xenon-Kurzbogenlampen ist jedoch das gesamte Wellenlängenspektrum vorhanden.

Eine Positionierung des Shutters vor den Ellipsoidspiegeln ist aufgrund des Kühlsystems der Strahler nicht erlaubt. Diese werden durch ein Gebläse gekühlt. Im Falle eines geschlossenen Shutters kann somit kein geregelter Luftstrom entstehen. Somit ist eine Positionierung des Shutters in der Trennwand oder im Bereich zwischen der Trennwand und den Strahlern möglich. Letzteres bringt jedoch keine Vorteile, da sich die abzublenkende Fläche vergrößert und die Zugänglichkeit verschlechtert wird.

Mit der Reduzierung der Funktionsprinzipien und der Möglichkeiten der Platzierung des Shutters zeigt sich, dass die erfolgversprechendste Lösung auf einer physischen Trennung basiert und in der Trennwand platziert werden soll. Im Folgenden werden aufbauend auf die zuvor gewählten Ausprägungen die entsprechenden Mechanismen vorgestellt und auf deren Einsatz hin bewertet.

Eine naheliegende Lösung besteht darin, den Shutter aus zwei gegeneinander laufenden Schiebelamellen zu gestalten (siehe Abbildung 44). Auf demselben Prinzip basiert der bereits seit vielen Jahren am Sonnenofen eingesetzte Shutter. Aufgrund des begrenzten Bauraumes ist ein solcher Shutter jedoch weder in horizontaler noch in vertikaler Bauweise unterzubringen. Eine angedachte Profilierung der Lamellen in Form eines rautenförmigen Öffnungsprofils (siehe Abbildung 45) führt ebenfalls zur Bauraumüberschreitung. Nach den Simulationsergebnissen zur Form des Shutters (siehe Kapitel 3.3) bringt ein Shutter mit einem runden Öffnungsprofil bzw. in diesem ähnlichen Fall keinen Vorteil gegenüber einem Öffnungsprofil nach dem Prinzip eines Vorhangs.

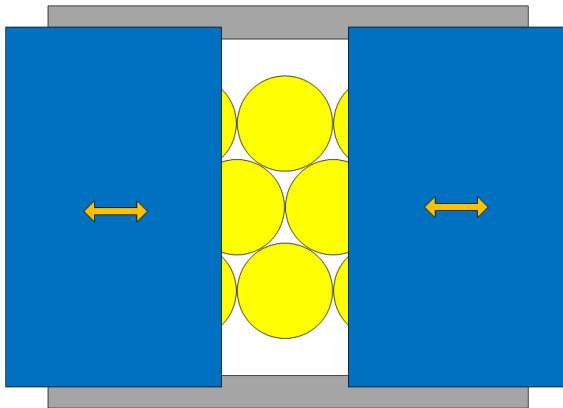


Abbildung 44 Schiebelamellenshutter

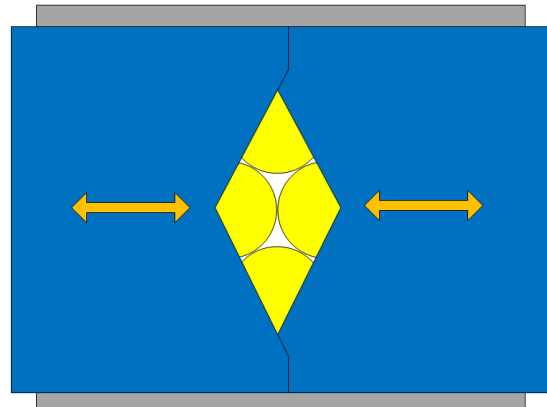


Abbildung 45 Rautenshutter

Um Bauraum einzusparen bietet es sich an, die ansonsten zu breiten Schiebelamellen durch mehrere schmalere miteinander gekoppelten Lamellen zu ersetzen. Diese können im geöffneten Zustand ineinander und beim Ausfahren ähnlich einer Teleskopstange auseinander fahren (siehe Abbildung 46). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Lamellen in der Breite eines einzelnen Lichtkegels zu gestalten. Wird eine Lampe vollständig verdeckt, kann diese ausgeschaltet werden und die Lamellen werden weiter verfahren (siehe Abbildung 47).

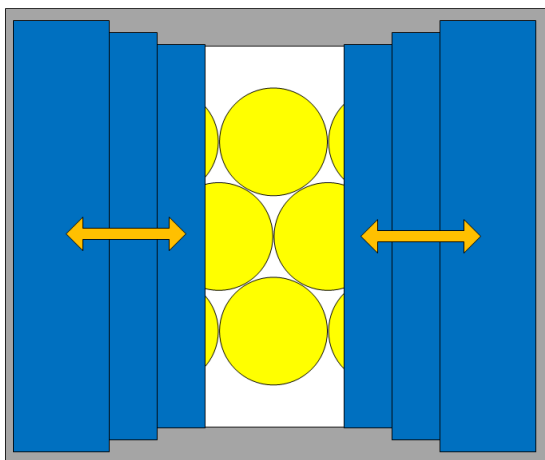


Abbildung 46 Teleskopshutter

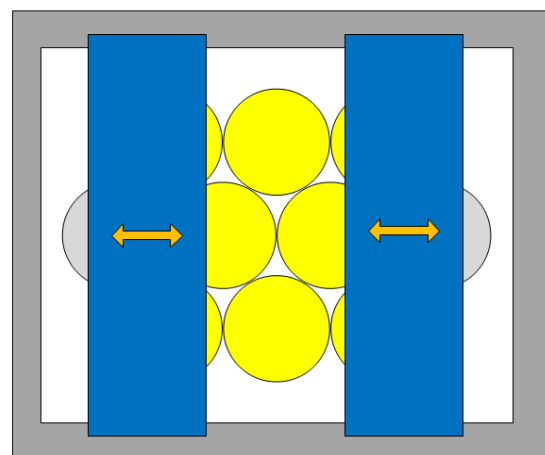


Abbildung 47 Partieller Shutter

Anstatt verschiebbarer Lamellen können diese ebenso gedreht oder geschwenkt werden. Wird ein Drehgelenk am Rahmen befestigt können die Lamellen ähnlich herkömmlicher Türen aufgedreht werden (siehe Abbildung 48). Eine erste Bauraumabschätzung zeigt jedoch, dass ein Aufdrehen aufgrund des geringen Abstandes zu den Strahlern nicht möglich ist. Daher bietet sich ein Schwenktürsystem an, bei dem die Türelemente linear in der Trennwand geführt und über einen drehbaren Ausleger aufgeschwenkt werden (siehe Abbildung 49).



Nachteilig an diesem Konzept ist das erforderliche hohe Drehmoment zur Bewegung des Systems.

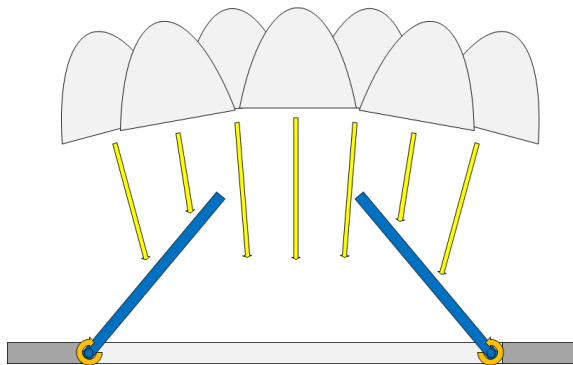


Abbildung 48 Drehtürshutter

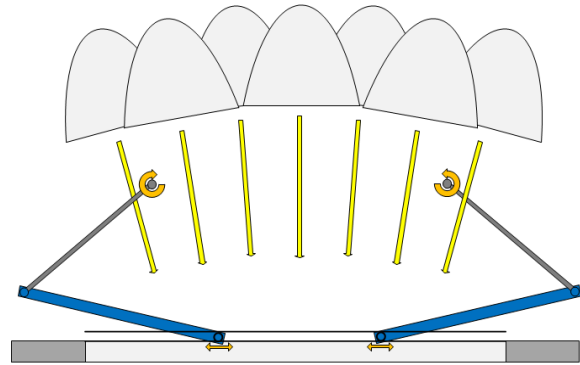


Abbildung 49 Schwenktürshutter

Basierend auf dem Vorbild der Fassadenverschattung (siehe Abbildung 39) ist ein Faltscherenlamellenshutter denkbar. Hierbei werden mehrere Lamellen einseitig linear in der Trennwand geführt und über Gelenke gekoppelt, sodass über eine Drehbewegung ein Auf-schieben und Zusammenklappen der Lamellen eingeleitet wird (siehe Abbildung 50). Die aufwendige Mechanik ist jedoch als fehleranfällig anzusehen. Ein deutlich einfacheres Prinzip kann mit einer beweglichen Lochblende realisiert werden. Diese weist eine konstante Durchtrittsöffnung auf. Durch eine lineare Bewegung zu den Strahlern hin oder weg kann die durchtretende Strahlung reguliert werden (siehe Abbildung 51). Der große Nachteil dieses Mechanismus liegt in dem begrenzten Regelbereich, da die Durchtrittsöffnung in der Trennwand selbst bereits große Abmaße einnehmen müsste und ein vollständiger Verschluss der Trennwand nicht möglich ist.

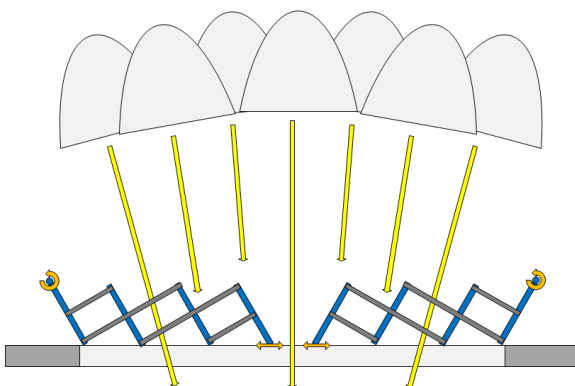


Abbildung 50 Faltscherenlamellenshutter

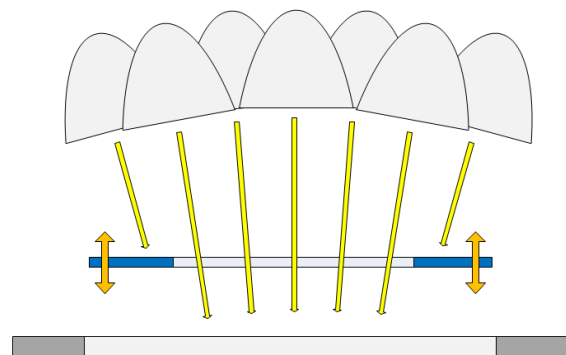


Abbildung 51 Bewegliche Lochblende

Beim Faltnamellenshutter sind die Lamellen über ein Drehgelenk miteinander verbunden (siehe Abbildung 52). Eine der Lamellen wird in der Trennwand linear geführt, die zweite wird über ein weiteres Drehgelenk mit dem Rahmen der Trennwand befestigt. Über eine Drehbewegung des letzteren Gelenks kann folglich ein Zusammenfallen der Lamellen eingeleitet werden. Der bereits vorab im Einsatz gewesene symmetrische Lamellenshutter ist als Shutterssystem weiterhin denkbar (siehe Abbildung 53). Die Recherche nach Shutterssystemen von externen Hochleistungsstrahlern und Sonnenöfen hat gezeigt, dass oftmals solche Systeme eingesetzt werden. Hinsichtlich der bekannten Probleme im Bereich der Fehleranfälligkeit wären dahingehend Optimierungen vorzunehmen.

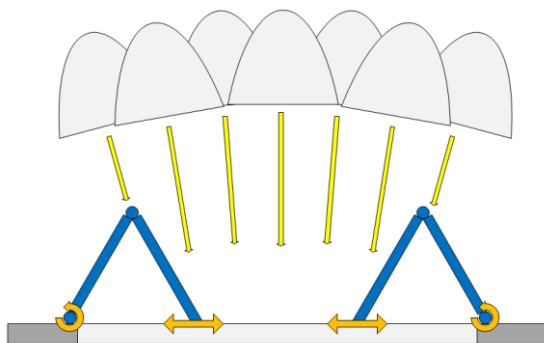


Abbildung 52 Faltnamellenshutter

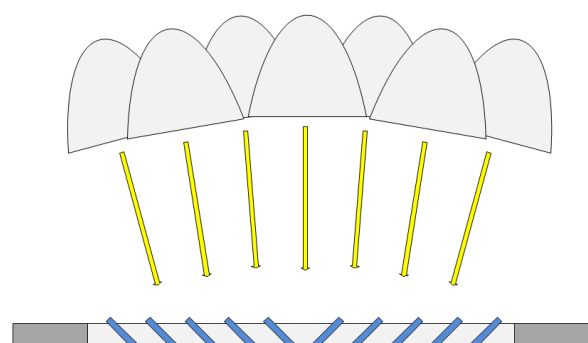


Abbildung 53 Symmetrischer Lamellenshutter

Nach dem Vorbild des Iris-Shutters sind zwei Ansätze als Shutterssystem denkbar (siehe Abbildung 54 und Abbildung 55). Beide Konzepte sind aufgrund der großen Abmaße und aufwendigen Mechanik jedoch nicht als Lösungsprinzip weiter zu verfolgen.

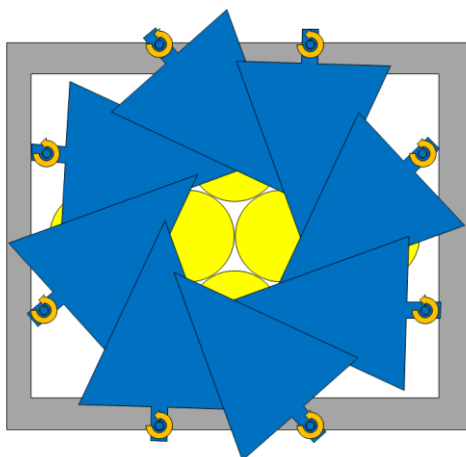


Abbildung 54 Iris-Shutter mit drehbaren Lamellen

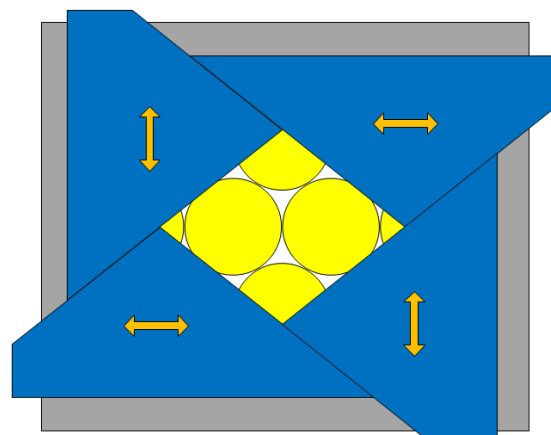


Abbildung 55 Iris-Shutter mit schiebbaren Lamellen

Aufgrund der bereits erwähnten Vor- und Nachteile haben sich die 4 Konzepte Teleskopshutter, partieller Shutter, Faltschere Lamellenshutter und symmetrischer Lamellenshutter als am vielversprechendsten herausgestellt und sollen im nächsten Schritt mittels einer Nutzwertanalyse näher untersucht werden. In der Auswahlliste sind nochmals die Entscheidungskriterien für die Auswahl der Konzepte zusammengefasst (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5 Auswahlliste

<b>Auswahlliste</b>									
Projekt: Entwicklung einer regelbaren Abblendvorrichtung					Datum: 10.08.2016				
Bearbeiter: Nicolas Overbeck									
Lösungsvariante (Lv) eintragen:		Beurteilen der Lösungsvariante (Lv):				Entscheiden über Lösungsvarianten (Lv):			
		(+) Auswahlkriterium erfüllt (-) Auswahlkriterium nicht erfüllt (?) Informationsmangel (!) Anforderungsliste überprüfen				(+) Lösung weiter verfolgen (-) Lösung scheidet aus (?) Information beschaffen und erneut befolgen (!) Anforderungsliste auf Änderungen überprüfen			
		Mit Aufgabenstellung verträglich							
		Forderungen der Anforderungsliste erfüllt							
		Grunds. Realisierungsschance gegeben							
		Zulässiger Aufwand zu erwarten							
		Unmittelbare Sicherheitstechnik gegeben							
		Im eigenen Bereich bevorzugt							
Lv	Bezeichnung	A	B	C	D	E	F	Bemerkung (Hinweise, Begründungen)	Entscheidung
1	Schiebetüreshutter	+	+	-				Abmessungen zu groß	
2	Teleskopshutter	+	+	+	+	+	+		+
3	Rautenshutter	+	+	-				Abmessungen zu groß	
4	Faltschere Lamellenshutter	+	+	+	+	+	+		+
5	Faltschere Lamellenshutter	+	+	+	-				-
6	Drehtürshutter	+	+	?				Abmessungen zu groß	-
7	Schwenktürshutter	+	+	?				Hohes Antriebsmoment	-
8	Partieller Shutter	+	+	+	+	+	+		+
9	4-Plattenshutter	+	+	-				Abmessungen zu groß	-
10	Unsymmetrischer Lamellenshutter	-						Ungleichmäßige Abschattung	-
11	Symmetrischer Lamellenshutter	+	+	+	+	+	+		+
12	Bewegliche Lochblende	+	-					Kleiner Regelbereich	
13	Irisshutter (Drehelemente)	+	+	-				Aufwendige Mechanik	-
14	Irisshutter (Schiebeelemente)	+	+	-				Aufwendige Mechanik	-
15	Gateaushutter	+	+	-				Größe der Lamellen	-
16	Elektrochromes Glas	+	-					Schaltzeit: 20min; Regelbereich: 15-55%	-

## 4.5 Nutzwertanalyse

Zur Ermittlung der optimalen Lösung wurde anhand der 4 aus der Vorauswahl herausgegangenen Konzepte eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Die Nutzwertanalyse wird anhand von 7 Bewertungskriterien durchgeführt (siehe Tabelle 6), welche mit einer Punktzahl zwischen 0 und 4 bewertet werden. Anhand dieses Bewertungsschemas werden die 4 Konzepte miteinander verglichen.



Zur besseren Veranschaulichung sind die Ergebnisse in Netzdiagrammen zusammengefasst (siehe Abbildung 56).

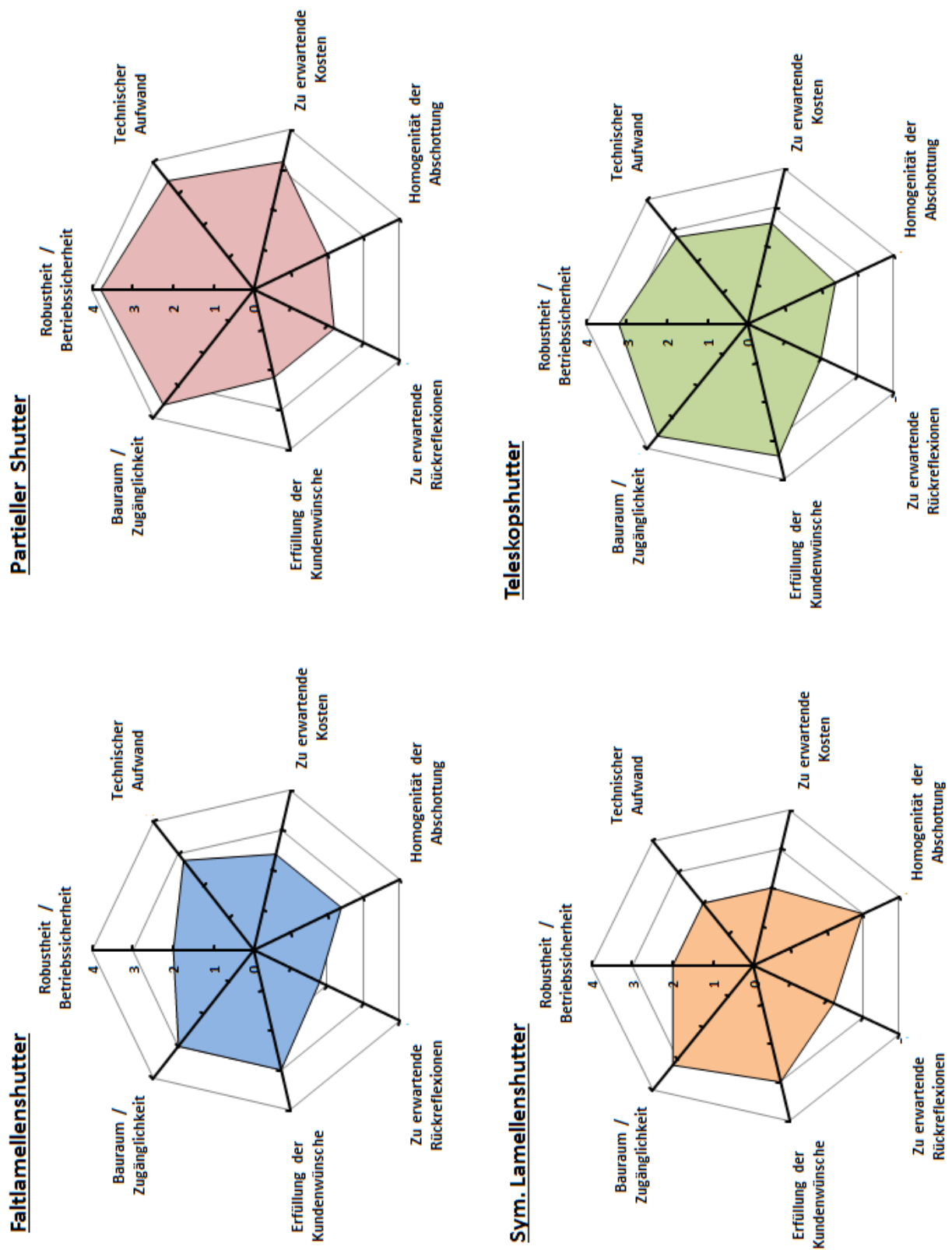


Abbildung 56 Ergebnis der Bewertung in Form von Netzdiagrammen

Bedenken beim Faltschutter werden in der Betriebssicherheit und den hohen zu erwartenden Rückreflexionen deutlich. Letztere sind jedoch unproblematisch, wenn die Lamellen mit einer mattschwarzen Farbe bestrichen werden. Diese absorbiert die einfallende Strahlung und verhindert eine Rückreflexion in den Ellipsoidspiegel, wodurch das Flusssichtprofil negativ beeinflusst wird. Bereits beim Bau vorheriger Shutter-Systeme hat sich dies als hilfreiches Mittel bewährt. Es gilt zu beachten, dass durch den hohen Emissionsgrad die thermische Belastung zunimmt. Beim symmetrischen Faltschutter werden ebenfalls die größten Bedenken bei der Betriebssicherheit gesehen. Ebenfalls wird ein hoher technischer Aufwand erwartet. Der partielle Shutter überzeugt durch eine gute Zugänglichkeit, einer sehr hohen Betriebssicherheit, einem geringen technischen Aufwand und geringen zu erwartenden Kosten. Neben den Rückreflexionen wird eine schlechte Homogenität der Abschattung bemängelt. Aus einer Diskussionsrunde ging jedoch hervor, dass diese im Falle einer Leistungsregulierung eine nicht allzu hohe Bedeutung zugesprochen werden soll. Der bereits seit vielen Jahren im Sonnenofen eingesetzte Shutter reguliert die einfallende Strahlung ebenfalls nicht homogen und die durchgeführten Simulationsergebnisse fielen ebenfalls positiv aus. Der größte Nachteil des partiellen Shutters wird vor allem in den nicht gänzlich zu erfüllenden Kundenwünschen gesehen. Manche Experimente werden in mehreren Zyklen bestrahlt. Der Shutter muss dabei kurzzeitig schließen und sich danach wieder öffnen. Die Strahler müssen währenddessen angeschaltet bleiben. Da die Lamellen jedoch nur den Lichtkegel einer Lampe abdecken können, kann dieser Kundenwunsch nicht erfüllt werden. Der Teleskopshutter hat ebenfalls in der Zugänglichkeit und der Betriebssicherheit überzeugt. Der technische Aufwand und die zu erwartenden Kosten werden ebenfalls im moderaten Bereich gesehen. Im Vergleich zum partiellen Shutter können alle Strahler ausgeblendet werden, wodurch auch zyklische Bestrahlungen möglich sind.

Um ein aussagekräftigeres Ergebnis zu erhalten werden die Kriterien einer Gewichtung unterzogen. Hierzu werden die einzelnen Kriterien in einer sogenannten Dominanzmatrix hinsichtlich deren Wichtigkeit gegenübergestellt (siehe Tabelle 8). Dabei werden spaltenweise die obigen Kriterien mit den seitenstehenden Kriterien verglichen. Eine „1“ bedeutet eine höhere, eine „0“ entsprechend eine geringere Wichtigkeit. Die spaltenweise addierte Punktzahl wird zum Verhältnis der Gesamtpunktzahl gesetzt, wodurch schlussendlich die Gewichtung als Ergebnis hervorgeht.



Abschließend werden die durchschnittlichen Punktzahlen mit den Gewichtungsfaktoren multipliziert. Das Ergebnis ist der gewichtete Wert. Die Addition aller gewichteten Werte ergibt die Endpunktzahl (siehe Tabelle 9).

Tabelle 8 Dominanzmatrix

	Robustheit/ Betriebssicherheit	Technischer Aufwand	Zu erwartende Kosten	Homogenität der Abschottung	Zu erwartende Rückreflexionen	Erfüllung der Kundenwünsche	Bauraum/ Zugänglichkeit
Robustheit/ Betriebssicherheit		0	0	0	0	0	0
Technischer Aufwand	1		0	1	1	1	1
Zu erwartende Kosten	1	1		0	1	1	0
Homogenität der Abschottung	1	0	1		0	1	0
Zu erwartende Rückreflexionen	1	0	0	1		1	0
Erfüllung der Kundenwünsche	1	0	0	0	0		0
Bauraum/ Zugänglichkeit	1	0	1	1	1	1	
Summe	6	1	2	3	3	5	1
Gewichtung	28,6%	4,8%	9,5%	14,3%	14,3%	23,8%	4,8%
Gewählte Gewichtung	35,0%	5,0%	10,0%	10,0%	10,0%	25,0%	5,0%
							Summe
							21
							100,0%
							100,0%

Tabelle 9 Ergebnis der Nutzwertanalyse

Nr.	Bewertungskriterien	K. 1: Faltschutter		K. 2: Partieller Shutter		K. 3: Teleskopshutter		K. 4: Sym. Lamellenshutter	
		Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert
1	Robustheit / Betriebssicherheit	2,0	0,7	3,8	1,3	3,2	1,1	2,0	0,7
2	Technischer Aufwand	2,8	0,1	3,4	0,2	2,8	0,1	2,0	0,1
3	Zu erwartende Kosten	2,4	0,2	3,2	0,3	2,6	0,3	2,0	0,2
4	Homogenität der Abschottung	2,4	0,2	2,0	0,2	2,4	0,2	3,0	0,3
5	Zu erwartende Rückreflexionen	1,8	0,2	2,2	0,2	2,0	0,2	2,2	0,2
6	Erfüllung der Kundenwünsche	3,0	0,8	2,2	0,6	3,4	0,9	3,0	0,8
7	Bauraum / Erreichbarkeit	3,0	0,2	3,6	0,2	3,6	0,2	3,2	0,2
Summe			2,4		3,0		3,0		2,4
Platzierung		2		1		1		2	

Aus der Nutzwertanalyse gehen die Konzepte partieller Shutter und Teleskopshutter punktgleich als am besten bewertet hervor. Die Konzepte Faltnamellenshutter und symmetrischer Lamellenshutter werden ebenfalls punktgleich als weniger geeignet bewertet. Der große Nachteil des partiellen Shutters, welcher keine zyklische Bestrahlung ermöglicht, hat schlussendlich zum Ergebnis geführt, dass der Teleskopshutter mit einem nicht allzu größeren technischen und finanziellen Aufwand als bestes Design gesehen wird.

## 5 Konstruktion

### 5.1 Ermittlung der thermischen Belastung

Zur Auslegung des Teleskopshutters wird im ersten Schritt die maximal zu erwartende thermische Belastung ermittelt um diese bei der Auswahl von Komponenten und Bauteilen zu berücksichtigen. Hierzu wird mit dem bereits vorab verwendeten Simulationstool OptiCad die Verteilung der Strahlungsintensität im Bereich der Trennwand berechnet. Die Ergebnisse können als .csv-Datei ausgegeben und anschließend mit MS Excel ausgewertet werden. Jeder Pixel der Apertur entspricht einer Länge von 10mm, sodass die Abmaße der Apertur 150x200 Pixel beträgt, was ca. den Abmaßen der Durchtrittsfläche in der Trennwand entspricht. Es ist angenommen worden, dass der Teleskopshutter aus je 2 Lamellen pro Seite besteht. Bei einer Gesamtbreite von 2m entspricht dies eine Breite von 0,5m pro Lamelle. Ausgehend von dieser Breite wird die maximale thermische Belastung von einer einzelnen Lamelle ermittelt (siehe Abbildung 57). Das Ergebnis beläuft sich auf 6,2kW thermischer Leistung.

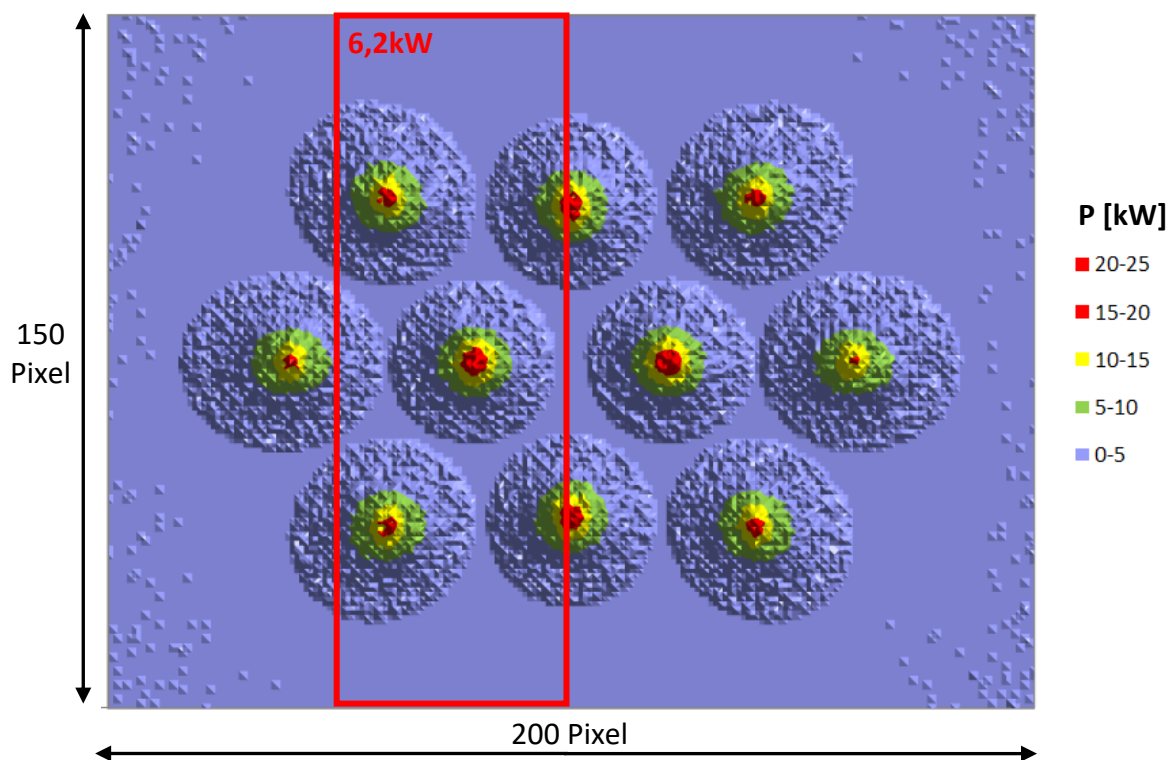
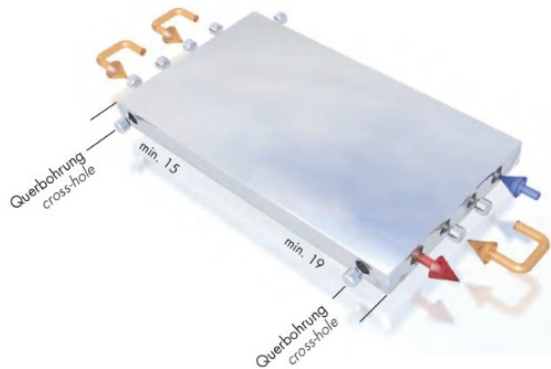


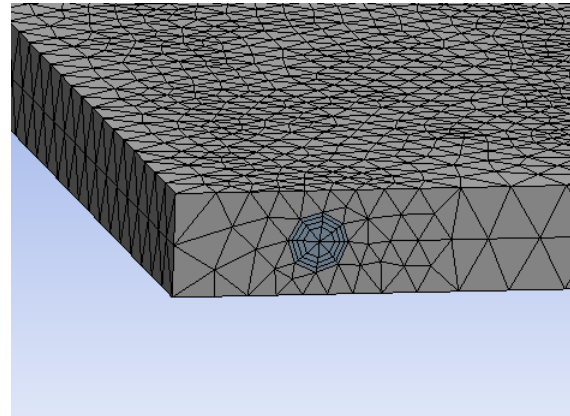
Abbildung 57 Ermittlung der maximalen thermischen Belastung für eine Lamelle

Auf Basis der Ergebnisse wird mit dem Simulationstool „ANSYS 16.2 Fluent“ ein Modell einer mit Kühlkanälen versehenen Lamelle erstellt. Solche mit Kühlkanälen versehene Aluminiumplatten werden unter dem Begriff Flüssigkeitskühler geführt und in der Regel zur Kühlung

von Elektronikkomponenten verwendet. Die Kühlkanäle werden im Strangpressverfahren hergestellt und durchziehen den gesamten Kühlkörper (siehe Abbildung 58). Anhand der Abmaße eines geeigneten Typs (Hersteller: Austerlitz Electronic GmbH, Typ: WK140.14/560-1450R) wird ein entsprechendes CAD-Modell erstellt. Bei der Vernetzung des Modells sind lokale Netzverfeinerungen im Bereich der Kühlkanalwand vorgesehen um turbulente Strömungen besser darzustellen (siehe Abbildung 59).



**Abbildung 58 Flüssigkeitskühler der Fa. Austerlitz Electronic GmbH [19]**



**Abbildung 59 Lokale Netzverfeinerung im Bereich der Kühlkanalwand**

Zur Berechnung der Kühlung wird der Volumenstrom des Kühlwassers benötigt. Dieser wurde experimentell ermittelt und beträgt bei dem zum Zeitpunkt der Messung anliegenden Wasserdruck von 4,6bar 6L/min. Abschließend werden auf Grundlage der vorherigen Berechnung (siehe Abbildung 57) die Flussdichten bestimmt und entsprechend ins Modell eingefügt (siehe Abbildung 60). Das Ergebnis der Berechnung sagt maximale Temperaturen von 328K (ca. 55°C) im Peak der Flussdichteverteilung voraus. An dem äußeren Plattenbereich stellen sich Temperaturen von 317K (ca. 44°C) ein. Deutlich wird auch der Anstieg der Plattentemperatur durch das zirkulierende und sich aufheizende Kühlwasser (siehe Abbildung 61).

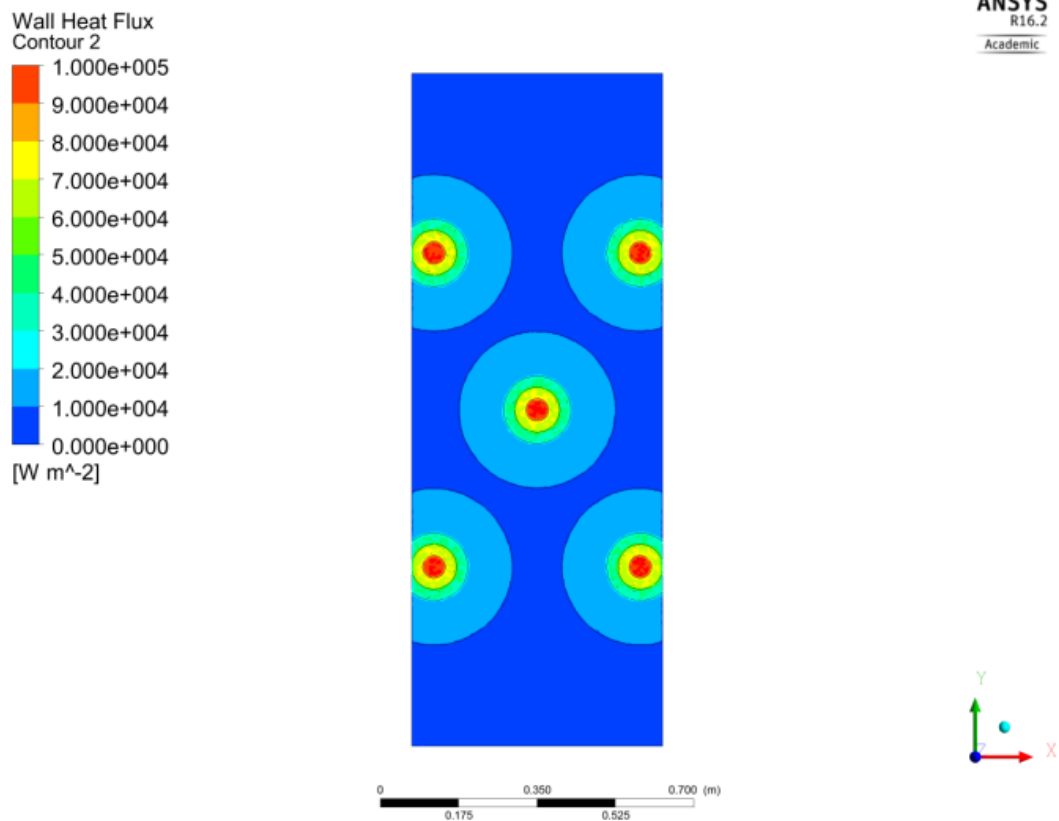


Abbildung 60 Modell des Flüssigkeitskühlers mit Angabe der aufgetragenen Flussdichten

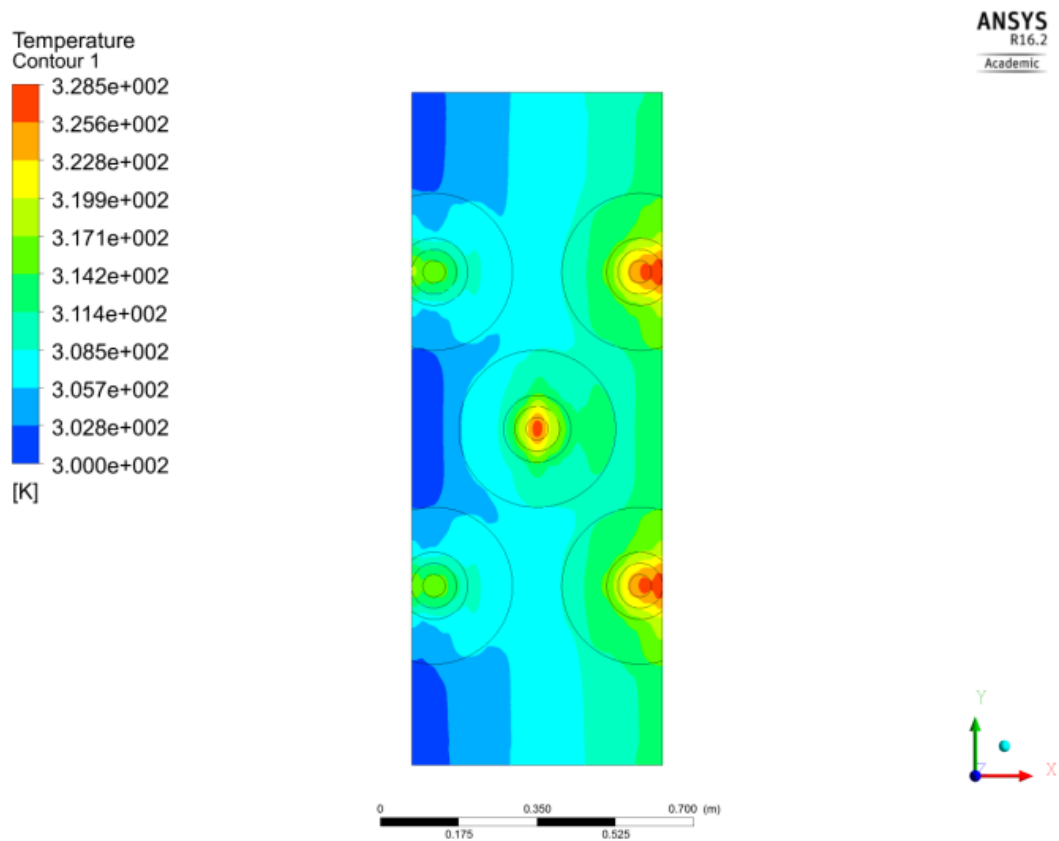
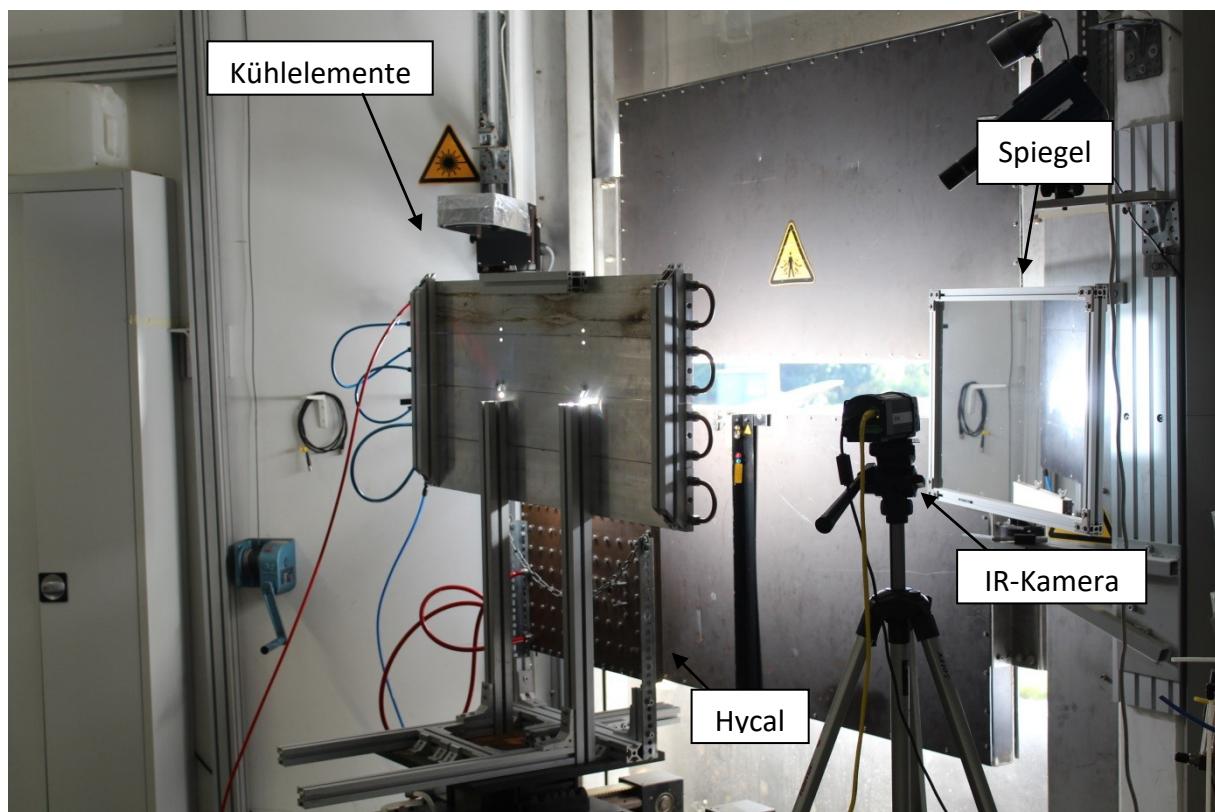


Abbildung 61 Ergebnis der Berechnung mit Angabe der zu erwartenden Temperaturen

Zur Validierung der Simulationsergebnisse sollen diese mittels eines Praxisversuchs überprüft werden. Hierzu sind vier aus dem Altbestand vorhandene Kühlelemente verschraubt und mittels Kühlleitungen verbunden worden. Ein Testaufbau im Strahler war zum derzeitigen Zeitpunkt aufgrund der hohen Auslastung nicht möglich. Stattdessen ist der Versuch am Sonnenofen durchgeführt worden. Der Aufbau besteht aus den verschraubten Kühlelementen, einem darunter positionierten Sensor zur Flussdichtemessung (hier Hycal) und einer Wärmebildkamera zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen (siehe Abbildung 62). Die Kühlelemente sind mit einem Offset von 0,5m vor dem Fokus positioniert. Um die Frontseite der Kühlelemente mit der Wärmebildkamera zu erfassen, wird ein Spiegel zur Umlenkung der Wärmestrahlen zur Hilfe gezogen.



**Abbildung 62 Versuchsaufbau zur Ermittlung der thermischen Belastung am Sonnenofen**

Die gewünschte Strahlungsleistung ist von der aktuellen Sonneneinstrahlung und der Shutteröffnung abhängig. Anhand sogenannter Shutterfunktionen kann die gewünschte Leistung bei optimaler Sonneneinstrahlung in Bezug auf die Shutteröffnung abgeschätzt werden. Die Bestrahlung der Kühlelemente wird zuerst mit einer geringen Leistung und anschließend mit der zu erwartenden maximalen thermischen Belastung durchgeführt.



Hierzu wird der Shutter vorerst zu 10 % geöffnet, was einer Leistung von 2,7 kW, und anschließend zu 25 % geöffnet, was einer Leistung von 6,9 kW entsprechen sollte. Zum Zeitpunkt der Messung lag eine Sonneneinstrahlung von ca. 800 W/m<sup>2</sup> vor. Im Optimalfall wird von einer Einstrahlung von ca. 900 W/m<sup>2</sup> ausgegangen [1]. Eine im Nachhinein durchgeführte Flusssichtmessung mittels der Software „FMAS“ hat gezeigt, dass sich somit die Gesamtleistung bei 10 % Shutteröffnung auf 2,08 kW und bei 25 % auf 5,67 kW verringert hat (siehe Abbildung 63 und Abbildung 64).

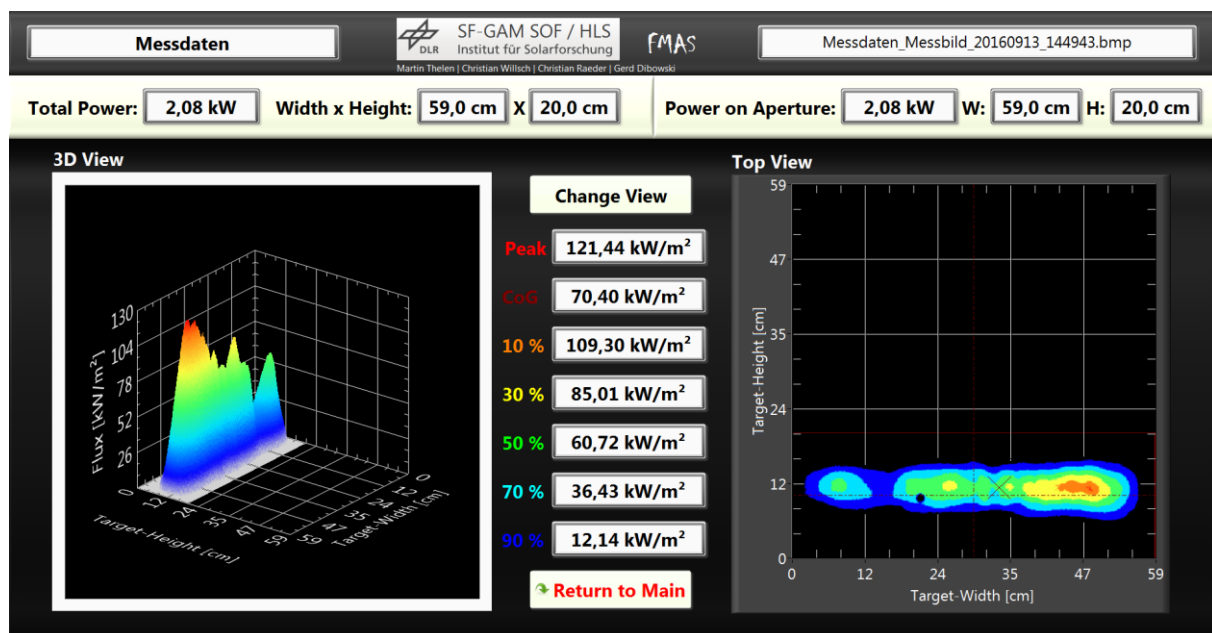


Abbildung 63 Flusssichtmessung mit der Software FMAS bei 10% Shutteröffnung

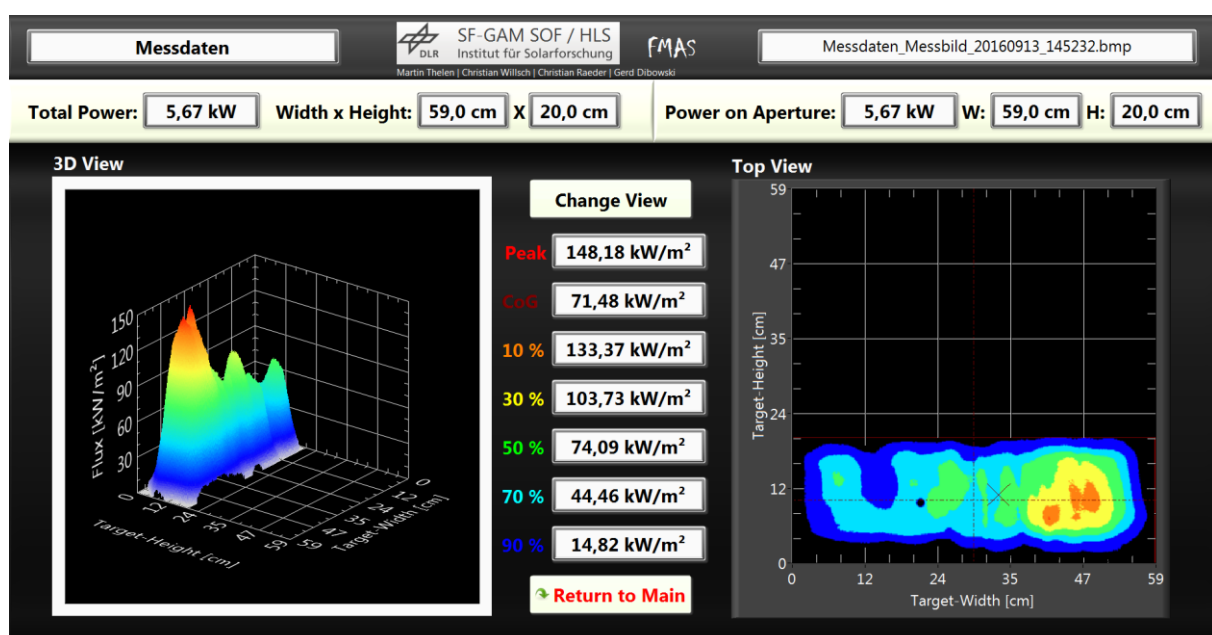


Abbildung 64 Flusssichtmessung mit der Software FMAS bei 25% Shutteröffnung

Die Auswertung der Wärmebilder zeigt, dass bei einer Shutteröffnung von 10 % Maximaltemperaturen von 52,9 °C entstehen (siehe Abbildung 65). Bei einer Shutteröffnung von 25 %, was ca. der maximalen Belastung entspricht, entsteht eine Maximaltemperatur von 80,5 °C (siehe Abbildung 66). Außerhalb der bestrahlten Fläche steigen die Temperaturen bis auf 37,6 °C an. Im Vergleich zur CFD-Simulation ist die Maximaltemperatur um 25 °C gestiegen. Dies ist auf die deutlich höheren Flussdichten zurückzuführen, welche bei der Simulation im Peak 10 kW/m<sup>2</sup> und im Versuch 148 kW/m<sup>2</sup> beträgt. Ein größerer Offset zwischen den Kühlelementen und dem Brennpunkt des Sonnenofens könnte hier Abhilfe schaffen, ist jedoch aufgrund der räumlichen Begebenheiten nicht möglich gewesen. Die Temperaturen in den äußeren Bereichen der Kühlelemente liegen hingegen nah beieinander. Diese werden vor allem durch das aufgeheizte Kühlwasser erwärmt. Bei gleicher thermischer Gesamtleistung sollte dieses demnach nahe beieinander liegen, was auch der Fall ist.

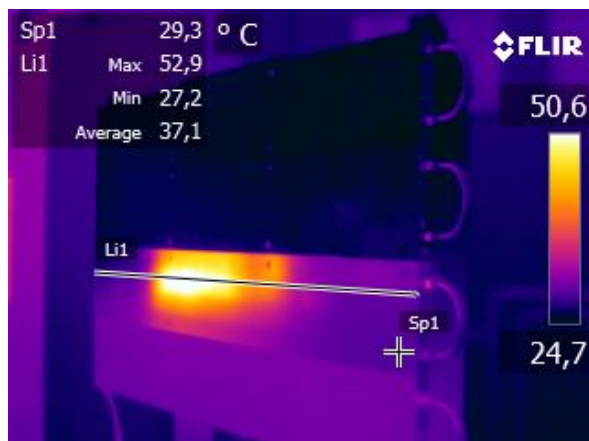


Abbildung 65 Wärmebild der Kühlelemente bei 10% Shutteröffnung



Abbildung 66 Wärmebild der Kühlelemente bei 25% Shutteröffnung

Die Ergebnisse der Simulation und des Praxisversuchs zeigen bis auf die Maximaltemperaturen ein ähnliches thermisches Verhalten. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich die Platten im Mittel bis auf ca. 40 °C und im Peak auf bis zu ca. 55-60 °C aufheizen werden.

## 5.2 Grobgestaltung

### 5.2.1 Anordnung der Komponenten

Der Teleskopshutter lässt sich in 4 Baugruppen unterteilen: Der Antrieb, die Führung, die Kühl lamellen und die Kühlwasserzu- und abfuhr. Bevor eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Baugruppen durchgeführt wird, ist zuvor deren Anordnung festzulegen (siehe Abbildung 67). Das Kühlwasser wird über den hauseigenen Wasseranschluss bezogen.

Über Kühlschläuche wird das Wasser zu den Kühllamellen geführt. Dabei ist auf eine ausreichende Beweglichkeit der Kühlschläuche zu achten. Da mögliche Leckagen nicht gänzlich auszuschließen sind, ist es sinnvoll die Kühlwasserzuführung im unteren Bereich zu positionieren. Im Falle einer Leckage sind die dadurch entstehenden Umstände am geringsten. Aufgrund der einfacheren Lagerung ist es sinnvoll die Kühllamellen hängend zu führen. Daher wird die Führung über den Kühllamellen positioniert sein. Um die Kraftleitung möglichst kurz zu halten, soll die Antriebseinheit möglichst nah an der Führung positioniert werden. Die Anzahl der Kühllamellen je Seite beläuft sich auf zwei. Dies begründet sich mit dem zur Verfügung stehenden Bauraum, welcher es erlaubt diese neben der Durchtrittsöffnung zu positionieren. Von einer Erhöhung der Anzahl der Kühllamellen ist abzusehen, da hierdurch die Fehleranfälligkeit steigt.

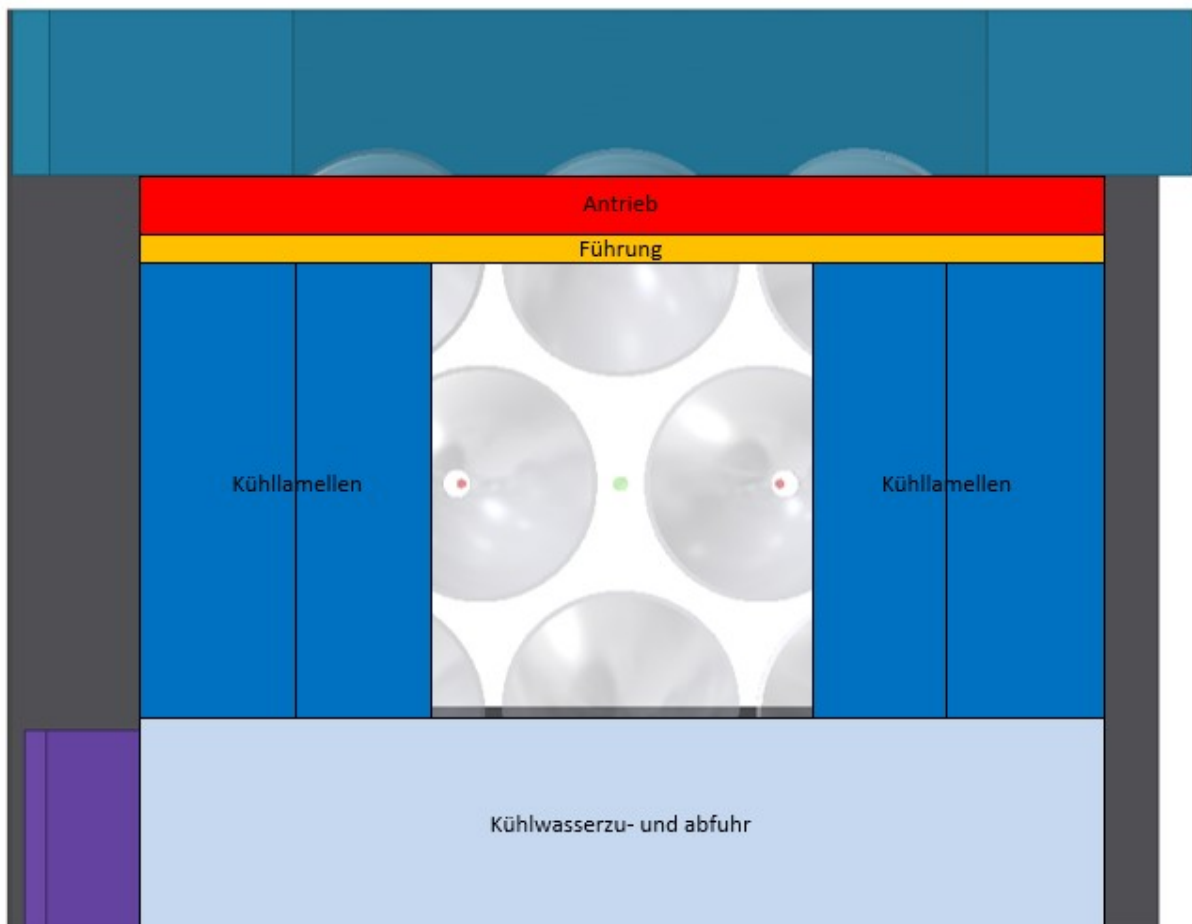
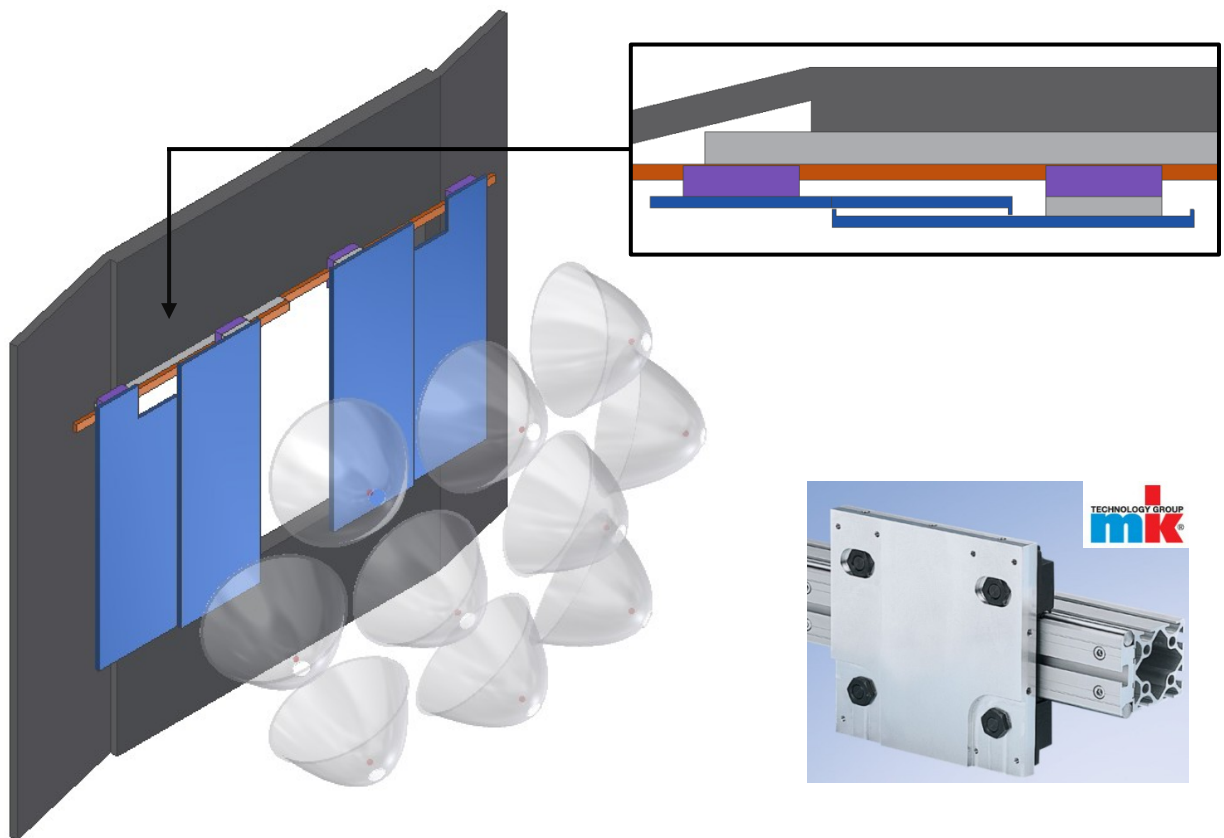


Abbildung 67 Anordnung der Baugruppen

### 5.2.2 Gestaltung von Führung und Antrieb

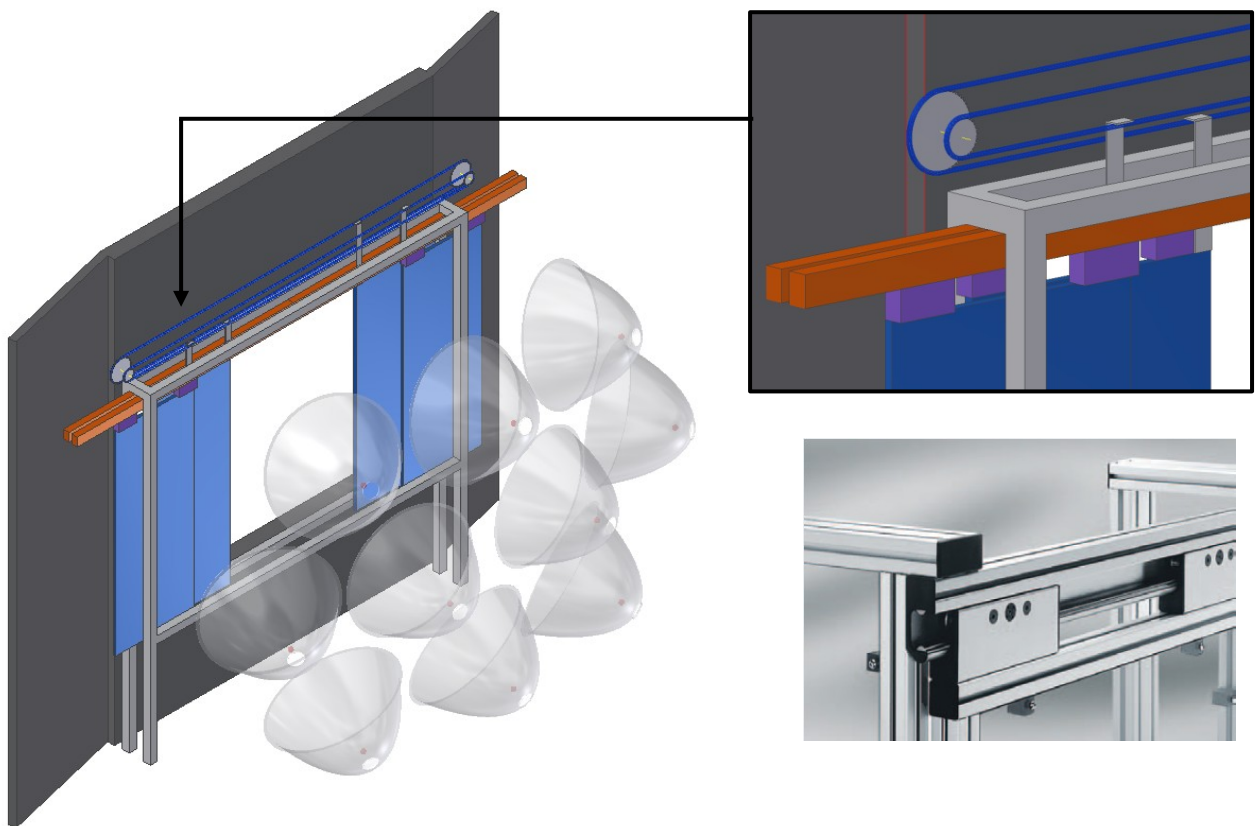
Bei der Gestaltung der Führung sind zwei verschiedene Ansätze entwickelt worden. Diese unterscheiden sich vor allem in der Realisierung der Teleskopfunktion. Beim ersten Ansatz werden die äußeren Lamellen über Mitnehmer mitgezogen (siehe Abbildung 68). Diese können in Form eines Anschlags gestaltet sein. Die inneren Lamellen sind daher mit einem Antrieb zu versehen. Über entsprechende Laufrollenführungen werden die Lamellen an der Oberseite des Rahmens geführt. Die Führungswagen sind bei den jeweiligen Lamellen links- bzw. rechtsseitig positioniert. Die äußeren Lamellen sind mit einer Aussparung versehen, sodass die Lamellen im zusammengefahrenen Zustand hintereinander positioniert werden können.



**Abbildung 68** Realisierung der Führung und der Teleskopfunktion nach dem Mitnehmerprinzip; Bild u. r.: Laufrollenführung der Fa. Maschinenbau Kitz GmbH [20]

Eine andere Möglichkeit zur Gestaltung der Führung besteht darin, die Lamellen auf getrennten Führungen zu bewegen (siehe Abbildung 69). Anders als beim vorherigen Ansatz werden die Lamellen hängend geführt. Solche Führungssysteme sind bei der Fa. item Industrietechnik GmbH erhältlich. Die Kopplung der Lamellen erfolgt nun nicht mehr über Mitnehmer, sondern über einen getrennten Antrieb der Lamellen. Denkbar ist hier ein System bestehend aus einem Ketten- bzw. Riementrieb, welcher mit entsprechenden Haltern an den Füh-

rungswagen befestigt wird. Durch die Befestigung der Führungswagen am oberen bzw. unteren umlaufenden Trieb bewegen sich diese beim Antrieb des Riemens oder der Kette entsprechend gegenläufig auf und zu. Zur Realisierung der Teleskopfunktion fahren die Lamellen mit verschiedenen Geschwindigkeiten aus. Hierzu sind 2 getrennte Triebe vorgesehen, welche sich im Durchmesser der Kettenräder bzw. Zahnriemenscheiben unterscheiden. Bei einem Durchmesser Verhältnis von 2 legen die Lamellen am größeren Trieb entsprechend den doppelten Weg zurück im Vergleich zu den Lamellen am kleineren Trieb. Die Befestigung der Führungselemente und des Antriebs erfolgt über ein zusätzliches Rahmengestell.



**Abbildung 69 Realisierung der Führung und des Antriebs über getrennte Führungen und zwei umlaufenden Triebe; Bild u. r.: C-Schienenführung der Fa. item Industrietechnik GmbH [21]**

Der Vorteil des 2. Ansatzes besteht darin, dass die Lamellen gleichmäßig ohne Unterbrechung ausgefahren werden können. Im Falle des Mitnehmerprinzips ist das System kurz vor der Mitnahme abzubremesen um eine sanfte Mitnahme zu ermöglichen. Dies kostet Zeit. Zusätzlich wirkt beim 1. Ansatz ein hohes Kippmoment auf den Führungen, wodurch diese entsprechend groß dimensioniert werden müssen. Im Falle eines hängenden Systems ist die Krafteinleitung deutlich günstiger. Diese Argumente führen dazu, dass der Teleskopshutter nach dem 2. Ansatz realisiert wird.

### 5.2.3 Kühlung

Die Kühlwasserzuführung befindet sich wie bereits erwähnt unterhalb der Lamellen. Die beiden linken bzw. rechten Lamellen bilden dabei jeweils einen Kühlkreislauf. Da die inneren Lamellen einer höheren thermischen Belastung unterliegen, werden diese zuerst mit dem Kühlwasser versorgt. Das Kühlwasser durchfließt die Lamellen mäanderförmig und wird an den Aus- und Eingängen über entsprechende Umlenkungen verbunden. Um ein Verknoten der Kühlschläuche zu vermeiden, sollen die Kühlschläuche ähnlich einer Energiekette geführt werden (siehe Abbildung 70 und Abbildung 71). Entsprechende Kühlschläuche der Fa. Parker Legris sind bis 70°C hitzebeständig. Die Polyuretahn-Ether-Schläuche sind vor der hohen UV-Belastung der Strahlung durch Abdeckungen zu schützen.

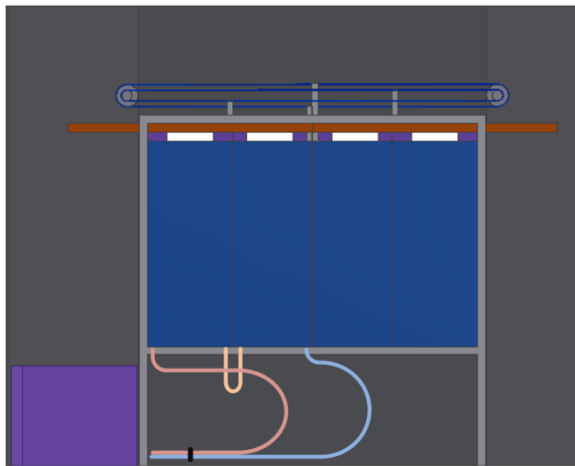


Abbildung 70 Anordnung der Kühlschläuche im geschlossenen Zustand

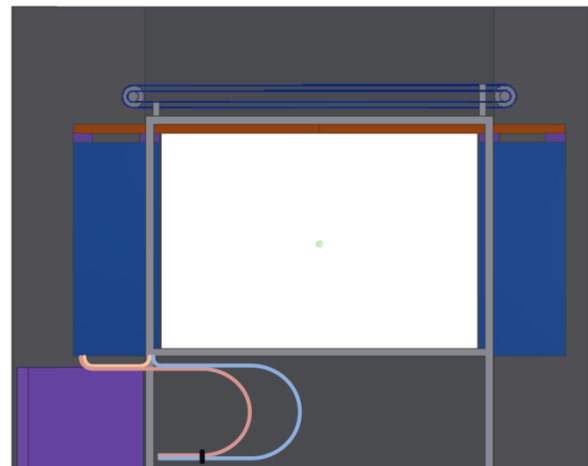
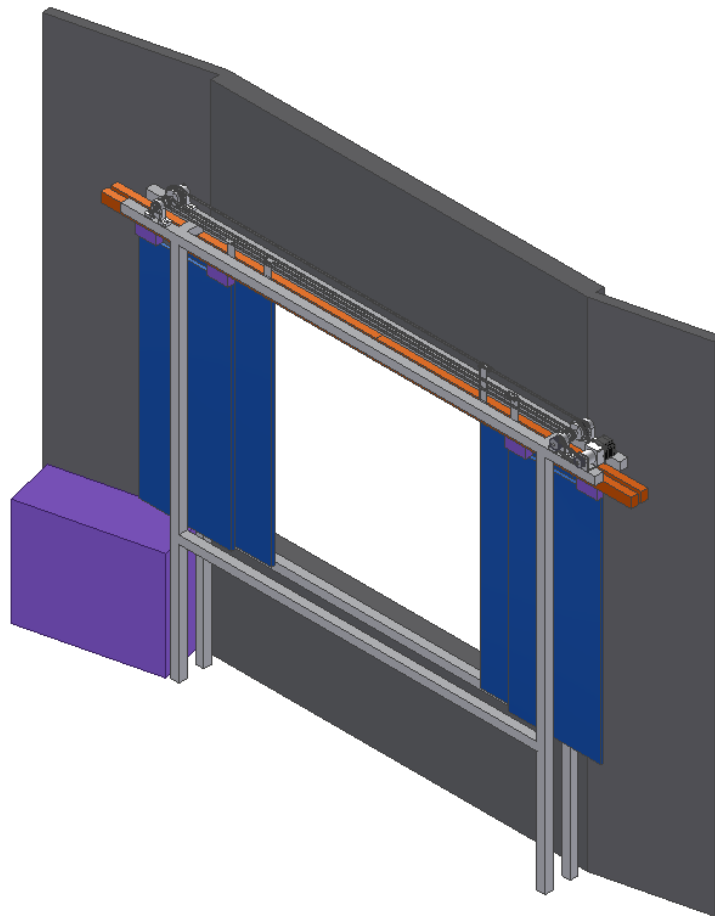


Abbildung 71 Anordnung der Kühlschläuche im geöffneten Zustand



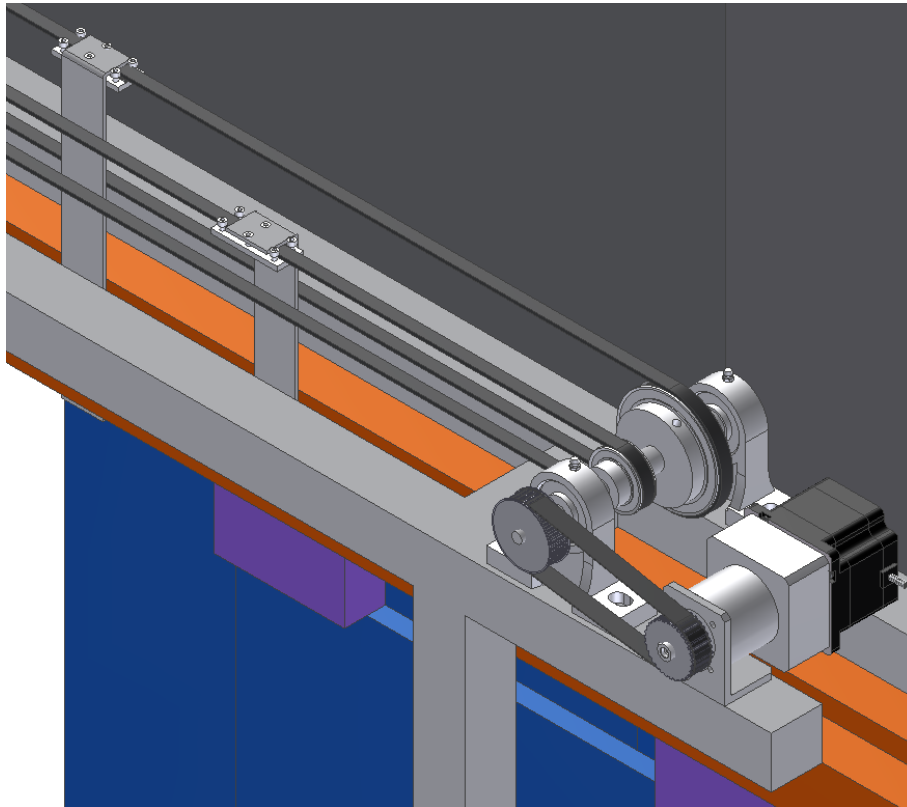
### 5.2.4 Grobentwurf

Aus den bisherigen Ansätzen ist ein vorläufiges CAD-Modell erstellt worden:



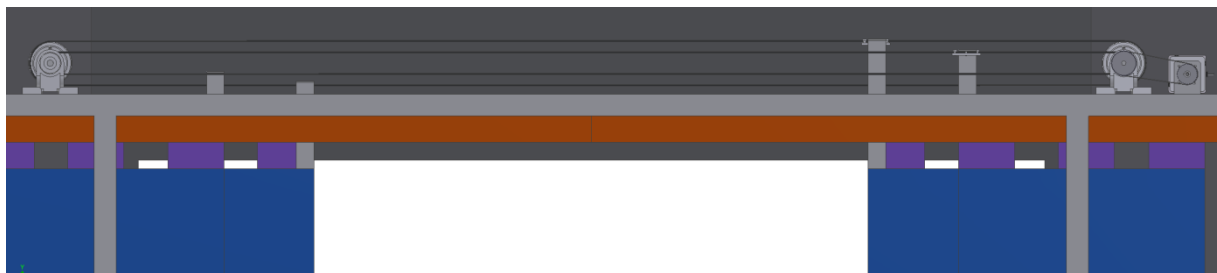
**Abbildung 72** Vorläufiges CAD-Modell des Teleskopshutters

Die Antriebseinheit bildet ein Schrittmotor mit Planetengetriebe. Bei der Wahl des Zugmitteltriebs fiel die Entscheidung auf einen Riementrieb. Grund dafür ist die einfachere Handhabung und der wartungsarme Betrieb. Die maximale thermische Belastung beträgt bei einem PU-Zahnriemen 80°C und ist nach den zuvor gemachten Untersuchungen ausreichend. Die Zahnriemenscheiben zum Antrieb der Kühl lamellen befinden sich auf einer separaten Welle. Die Lagerung der Welle wird über Lagerböcke realisiert. Die Halterung zur Befestigung der Führungswagen mit dem Zahnriemen erfolgt über einen Blechwinkel und einer sogenannten Anschraubklemme, welcher mit einer Verzahnung versehen sind. Der Zahnriemen wird zwischen Anschraubklemme und Blechwinkel gelegt und anschließend verschraubt (siehe Abbildung 73).



**Abbildung 73** Vorläufige Antriebs- und Führungseinheit

Auf der Gegenseite befindet sich eine nahezu identische Lagereinheit, welche wiederum aus 2 Lagerböcken, einer Welle und den Zahnriemenscheiben besteht (siehe Abbildung 74).



**Abbildung 74** Vorläufige Antriebs- und Führungseinheit in der Frontansicht

### 5.3 Feingestaltung

Bevor eine endgültige Festlegung der Abmaße erfolgt, sind nachfolgend die Berechnungen zur Auslegung des Antriebs, der Führung und der Lagerungen aufgeführt.

Als erstes ist sicherzustellen, dass es beim Antrieb der Schienenführung nicht zum Verkippen kommt. Die Führungsschlitten weisen an beiden Enden jeweils eine Führungsrolle auf, welche auf einer Schiene entlang rollen. Für ein ruhiges Laufverhalten ist sicherzustellen, dass die nachlaufende Rolle beim Verfahren nicht angehoben wird.

Betrachtet wird hierzu das freigemachte System, bestehend aus einer Kühllamelle, welche über die zwei Rollenführungen gelagert und über einen Ausleger zentrisch angetrieben wird (siehe Abbildung 75).

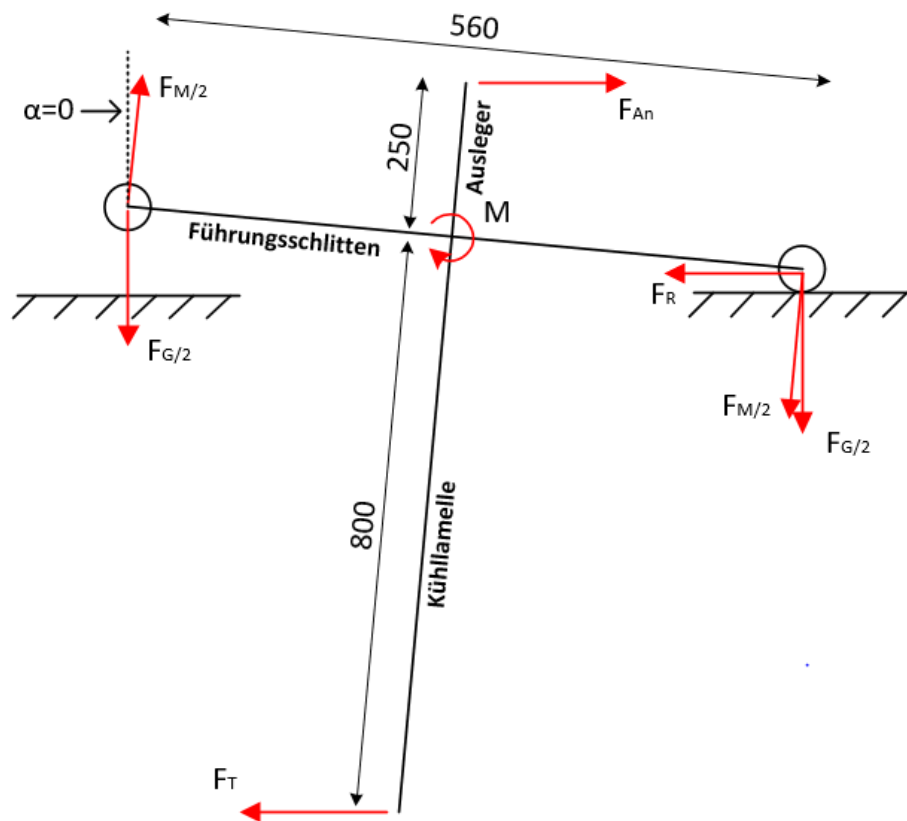


Abbildung 75 Freigemachte Führungseinheit

Es ist zwischen 2 Zuständen zu unterscheiden:

**1.  $F_{An} \leq F_R$  (im Stillstand,  $a = 0$ )**

Im Stillstand ist die Reibkraft größer als die Antriebskraft und die Beschleunigung entsprechend gleich null. Die Reibkraft  $F_R$  setzt sich aus der Reibkraft  $F_{R,G}$ , basierend auf der Gewichtskraft, und der Reibung der Führung  $F_{R,F}$ , basierend auf Angaben der Fa. item, zusammen.

$$F_R = F_{R,G} + F_{R,F}$$

Bei den vorläufig ausgewählten Flüssigkeitskühler der Fa. Austerlitz beläuft sich die Masse einer Lamelle auf ca. 40kg. Bei einem Reibwert von 0,05 berechnet sich die Reibkraft  $F_{R,G}$  wie folgt zu:

$$F_{R,G} = F_G * \mu = 400 \text{ N} * 0,05 = 20 \text{ N}$$

$$\mu_R = 0,05 \text{ (Stahl auf Stahl)}$$

Die Reibkraft der Führung beträgt nach Angaben der Fa. item:

$$F_{R,F} = 7,5 \text{ N}$$

Die Gesamtreibkraft  $F_R$  setzt sich aus den zuvor ermittelten Reibkräften zusammen. Die Antriebskraft kann in dieser Betrachtung mit der Reibkraft gleichgesetzt werden, das bis zum Start der Bewegung diese Maximal der Reibkraft entspricht.

$$F_{An} = F_R = 27,5 \text{ N}$$

Die Antriebskraft greift über die Halterung zur Montage am Zahnriemen auf die Führungseinheit. Diese wird vorläufig auf 250mm festgelegt. Hieraus ergibt sich ein Drehmoment von

$$M = F_{An} * 0,25 \text{ m} = 6,88 \text{ Nm}$$

welches auf die Führungseinheit wirkt. Aus dem Abstand der beiden Rollen kann abschließend die Kraft an der hinteren Rolle berechnet werden, welche diese nach oben zieht.

$$F_M = \frac{M}{0,28 \text{ m}} = 24,55 \text{ N}$$

Da die aus der Antriebskraft resultierende Kraft an der hinteren Rolle kleiner als die entsprechend nach unten ziehende Gewichtskraft ist, wird diese bis zum Start nicht anheben.

$$F_{M/2} < F_{G/2}$$

## 2. $F_{An} > F_R$ (im Lauf, $a_{max} = 2 \frac{m}{s^2}$ )

Der 2. Fall betrachtet die Führungseinheit im Lauf bei einer maximal angenommenen Beschleunigung von  $2 \text{ m/s}^2$ . Hieraus resultiert folgenden Trägheitskraft im Schwerpunkt der Kühllamelle:

$$F_T = m * a = 40 \text{ kg} * 2 \frac{m}{s^2} = 80 \text{ N}$$

Die Antriebskraft ist bereits aus der vorherigen Berechnung bekannt.

$$F_{An} = 400 \text{ N} * 0,05 + 7,5 \text{ N} = 27,5 \text{ N}$$

Die Trägheitskraft und die Antriebskraft erzeugen ein Moment von

$$M = 27,5 \text{ N} * 0,25 \text{ m} + 80 \text{ N} * 0,8 \text{ m} = 70,9 \text{ Nm}$$

welches wiederum eine Kraft an der hinteren Rolle von

$$F_M = \frac{70,9 \text{ Nm}}{0,28 \text{ m}} = 253,1 \text{ N}$$

erzeugt. Diese ist wieder kleiner als die Gewichtskraft, wodurch auch in diesem Fall mit keinem Abheben der hinteren Rolle zu rechnen ist.

$$F_{M/2} < F_{G/2}$$

### 5.3.1 Auslegung des Antriebs

Aus der berechneten Antriebskraft wird das erforderliche Drehmoment ermittelt. Hierzu sind vorläufige Zahnriemendurchmesser festgelegt worden (siehe Abbildung 76).

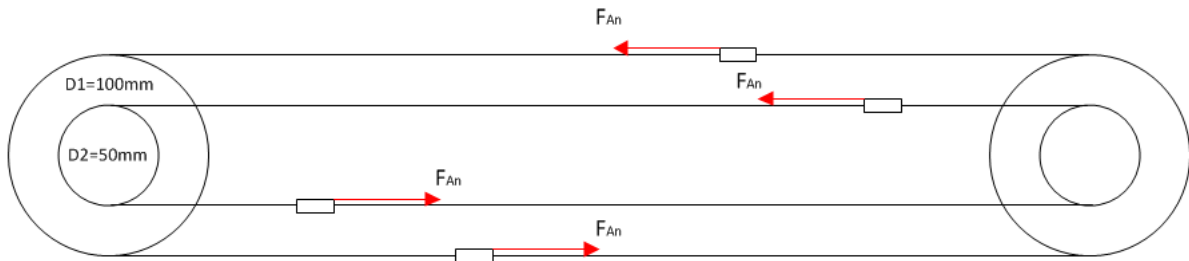


Abbildung 76 Freigemachte Antriebseinheit

Aus den gewählten Durchmessern ergibt sich das erforderliche Antriebsdrehmoment wie folgt zu:

$$M_{An} = F_{An}(D1 + D2) = 4,125 \text{ Nm}$$

Hierbei wird die Reibung der Lager, die Trägheitsmomente des Riemengetriebes und des Motors sowie die entstehenden Momente durch die Kühlschlauchführung vernachlässigt. Die Trägheitsmomente sind nach einer überschlägigen Rechnung jedoch gering und können daher außer Acht gelassen werden. Um eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten fiel die Wahl des Schrittmotors auf das Modell ST8918L4508 der Fa. Nanotec mit einem Haltemoment von 9,22 Nm. Zusätzlich ist bei der Übertragung des Drehmoments von der Motorwelle auf die Lagerwelle eine Übersetzung von 2 vorgesehen, sodass ein maximales Drehmoment von 18,44 Nm vorliegt.

Zur Ermittlung der Schließzeit wird der Verfahrweg der großen Zahnriemenscheibe bei einer Umdrehung berechnet:

$$u_{z,g} = d_{z,g} * \pi = 0,31 \text{ m}$$

Dies entspricht bei einem Gesamtverfahrweg von ca. 1 m 3,2 Umdrehungen zum vollständigen Verschluss des Ausschnitts. Bei einer geforderten Schließzeit von 3 Sekunden entspricht dies einer Drehzahl von  $63,6 \text{ min}^{-1}$ . Die Motorwelle muss demnach entsprechend der Übersetzung eine Drehzahl von  $127,2 \text{ min}^{-1}$  aufweisen. Anhand der Motorkennlinie beläuft sich das maximale Drehmoment bei gegebener Drehzahl auf ca. 8 Nm (siehe Abbildung 77). Dies liegt deutlich über den berechneten 4,125 Nm, welcher unter Einbezug der Übersetzung lediglich 2,063 Nm auf der Motorwelle fordert.

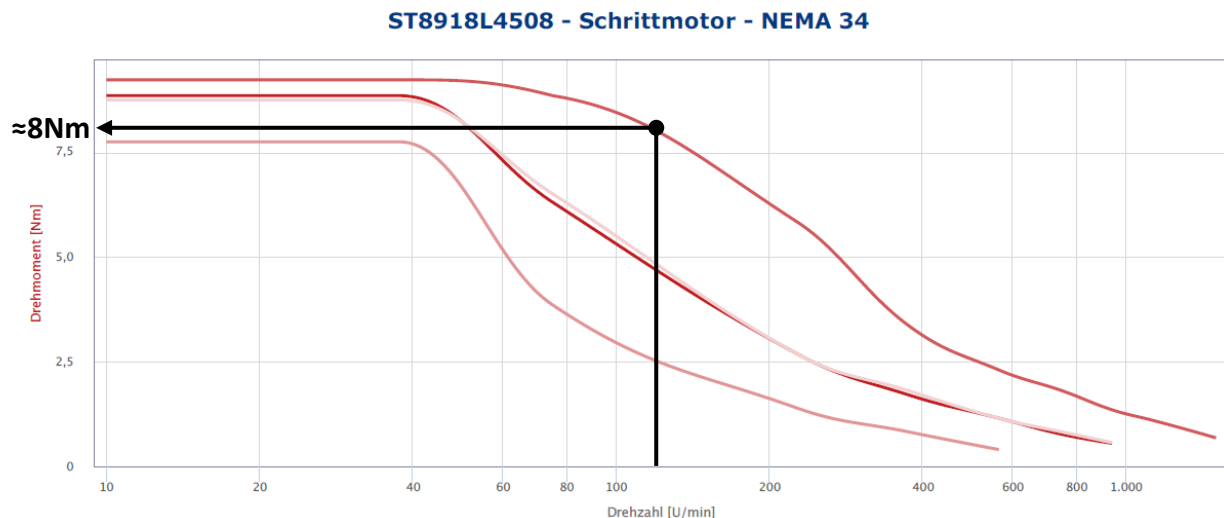


Abbildung 77 Motorkennlinie [22]

### 5.3.2 Auslegung des Riemengetriebes

Als nächstes erfolgt die Auslegung des Zahnriemens nach Roloff/Matek [23]. Die zuvor ermittelten Antriebswerte sind folgend überschlägig aufgerundet:

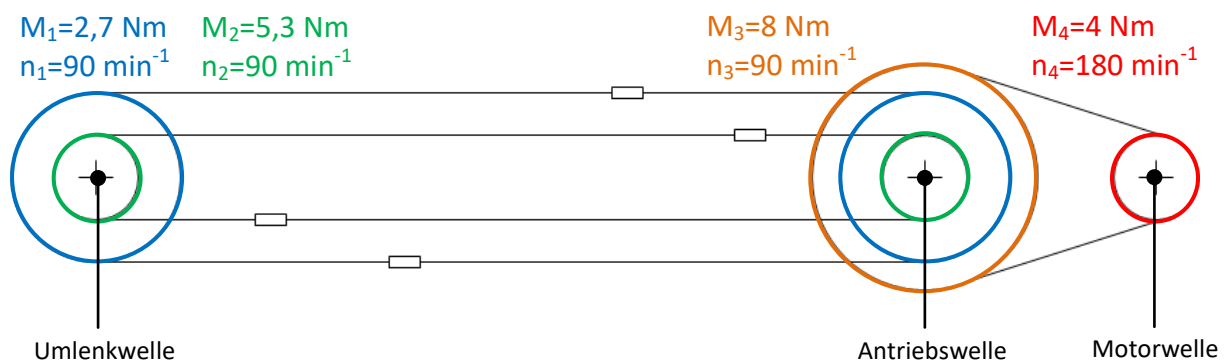


Abbildung 78 Freigemachte Antriebseinheit

Als erstes ist die Leistung der einzelnen Zahnriemen zu ermitteln. Diese berechnet sich wie folgt:

$$P = \frac{M \cdot n}{9550} \cdot K_A$$

Der Anwendungsfaktor  $K_A$  beträgt nach TB 3-5 1,1. Aus den Drehmomenten und Drehzahlen ergeben sich die einzelnen Leistungen der Riementriebe zu:

$$P_1 = 0,028 \text{ kW}$$

$$P_2 = 0,055 \text{ kW}$$

$$P_3 = P_4 = 0,083 \text{ kW}$$

Zur Bestimmung des minimalen Scheibendurchmesser der jeweiligen Riementriebe ist das Verhältnis von Leistung zu Drehzahl zu berechnen. Dies beläuft sich auf:



$$\frac{P_1}{n_1} = 0,00031$$

$$\frac{P_2}{n_2} = 0,00061$$

$$\frac{P_3}{n_3} = 0,00092$$

$$\frac{P_4}{n_4} = 0,00046$$

Anhand TB 16-7 sollte normalerweise der minimale Durchmesser abgelesen werden. Da in diesem Fall bereits der kleinste Wert der Tabelle unterschritten wird, kann hier lediglich der minimale Scheibendurchmesser abgeschätzt werden. Die kleine Zahnriemenscheibe hat mit einem gewählten Riemenprofil T10 und 18 Zähnen einen Scheibendurchmesser von 57,3 mm. Die entsprechend doppelt so große Zahnriemenscheibe hat mit 36 Zähnen einen Scheibendurchmesser von 114,59 mm. Für die Motorwelle wird eine Zahnriemenscheibe mit 20 Zähnen und einem Durchmesser von 63,66 mm gewählt. Die gewünschte Übersetzung wird entsprechend mit einer Zahnriemenscheibe mit 40 Zähnen und einem Scheibendurchmesser von 127,32 mm realisiert.

Zur Ermittlung der Wellenbelastung ist zunächst die Umfangkraft  $F_t$  zu berechnen.

$$F_t = \frac{P}{v}$$

Die Riemengeschwindigkeit  $v$  wird nach

$$v = d * \pi * n$$

berechnet.

$$F_{t1} = \frac{28 \text{ W}}{114,59 \text{ mm} * \pi * 90 \text{ min}^{-1}} = 51,9 \text{ N}$$

$$F_{t2} = \frac{55 \text{ W}}{57,3 \text{ mm} * \pi * 90 \text{ min}^{-1}} = 203,7 \text{ N}$$

$$F_{t3} = \frac{83 \text{ W}}{127,32 \text{ mm} * \pi * 90 \text{ min}^{-1}} = 138,3 \text{ N}$$

$$F_{t4} = \frac{83 \text{ W}}{63,66 \text{ mm} * \pi * 180 \text{ min}^{-1}} = 138,3 \text{ N}$$

Aufgrund der Fliehkräfte des Zahnriemens im Betrieb ist die Wellenbelastung im Stillstand maximal. Diese ergibt sich wie folgt zu:

$$F_{w0} \approx 1,1 * F_t$$

$$F_{w0,1} = 57,1 \text{ N}$$

$$F_{w0,2} = 224,1 \text{ N}$$

$$F_{w0,3} = 152,13 \text{ N}$$

$$F_{w0,4} = 152,13 \text{ N}$$

Zuletzt ist die erforderliche Riemenbreite zu bestimmen. Hierzu wird zunächst die Anzahl der im Eingriff befindenden Zähne bestimmt:

$$z_e = \frac{z * \beta^\circ}{360^\circ} \leq 12$$

$$z_{e1} = \frac{36 * 180^\circ}{360^\circ} = 18 \rightarrow 12$$

$$z_{e2} = \frac{18 * 180^\circ}{360^\circ} = 9$$

$$z_{e3} = \frac{40 * 235^\circ}{360^\circ} = 26 \rightarrow 12$$

$$z_{e4} = \frac{20 * 125^\circ}{360^\circ} = 7$$

Anschließend ist die spezifische Riemenzahnbelastbarkeit nach TB 16-20 abzulesen. Die Riemenbreite berechnet sich zuletzt nach

$$b \geq \frac{P}{z * z_e * P_{spez}}$$

$$b_1 \geq \frac{0,028 \text{ kW}}{36 * 12 * 1 * 10^{-4} \frac{\text{kW}}{\text{mm}}} = 0,65 \text{ mm}$$

$$b_2 \geq \frac{0,055 \text{ kW}}{18 * 9 * 1 * 10^{-4} \frac{\text{kW}}{\text{mm}}} = 3,4 \text{ mm}$$

$$b_3 \geq \frac{0,083 \text{ kW}}{40 * 12 * 1 * 10^{-4} \frac{\text{kW}}{\text{mm}}} = 1,7 \text{ mm}$$

$$b_4 \geq \frac{0,083 \text{ kW}}{20 * 7 * 2 * 10^{-4} \frac{\text{kW}}{\text{mm}}} = 3 \text{ mm}$$

Die minimale Riemenbreite sollte demnach 3,4mm betragen. Da beim gewählten Riemenprofil T10 solch kleine Riemenbreite nicht verfügbar sind, wird die kleinstmögliche gewählt, welche 16mm beträgt.

### 5.3.3 Lebensdauerberechnung der Lagereinheit

Zur Auslegung der Lagereinheiten sind die Lagerkräfte zu bestimmen. Für den Fall der angetriebenen Lagereinheit sind die beiden Lagerkräfte und die Wellenbelastungen der 3 Zahnriemenscheiben zu berücksichtigen (siehe Abbildung 79). Die Abmaße der Antriebswelle sind so gewählt, dass die Zahnriemen zentrisch über den Führungsschlitten verlaufen.  $F_1$  be-

zeichnet die zuvor berechnete Wellenbelastung des großen Zahnriementriebs,  $F_2$  die des kleinen Zahnriementriebs und  $F_3$  steht für die Wellenbelastung des Riemenstrieb zum Motor hin.

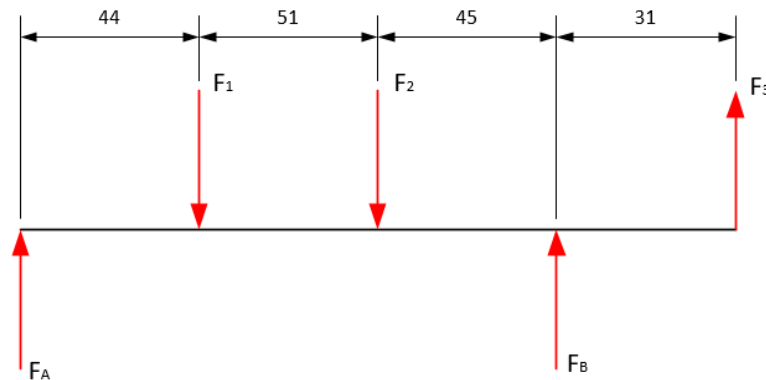


Abbildung 79 Freigemachte Lagereinheit

Nach dem freigemachten System belaufen sich die Lagerkräfte auf

$$F_A = 144,2 \text{ N}$$

$$F_B = -15,9 \text{ N}$$

Zur Lagerung der Welle werden sogenannte Stehlagereinheiten eingesetzt. Diese bestehen aus einer gusseisernen Aufnahme und einem bereits enthaltenen Kugellager. Bei der gewählten Stehlagereinheit der Fa. FYH werden spezielle Kugellager verwendet, welche eine gewisse Verkipfung zulassen. Da die Lagereinheiten auf einen Profilrahmen montiert werden, ist eine präzise Positionierung schwierig, wodurch das Verkippspiel einer einfacheren Montage zugutekommt.



Abbildung 80 Stehlagereinheit der Fa. FYH [24]

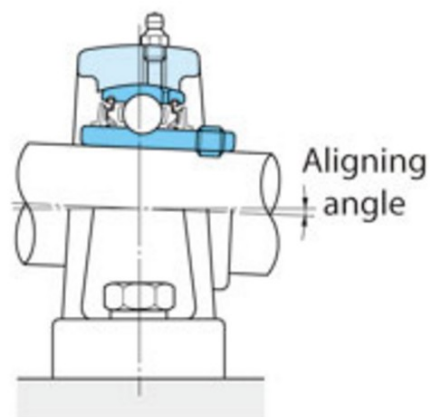


Abbildung 81 Erlaubtes Verkippspiel der Stehlagereinheiten [25]

Zur Bestimmung der Lebensdauer der Lagereinheit wird zunächst die äquivalente Lagerbelastung berechnet:

$$P = X * F_r + Y * F_a$$

Die Radial- und Axialfaktoren X und Y werden nach TB 14-3b. Da keine Axialkräfte wirken, fällt der Axialfaktor weg. Der Radialfaktor beläuft sich auf 1. Die jeweilige Lagerbelastung entspricht somit den zuvor ermittelten Lagerkräften  $F_A$  und  $F_B$ .

Die Wahl der Lagereinheit fiel auf ein Stehlager des Typs UCPH. Dieses weist eine dynamische Tragzahl C von 12800 N auf. Die nominelle Lebensdauer kann aus

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^3$$

berechnet werden. Für die höher belastete Lagereinheit A ergibt sich eine nominelle Lebensdauer von  $7 \cdot 10^{11}$  Umdrehungen. Da kein Dauerbetrieb der Lagereinheit vorhanden ist und die Lager stets kurzzeitig im Einsatz sind, ist das Lager ausreichend dimensioniert.

### 5.3.4 Bestimmung des erforderlichen Wellendurchmessers

Die Bestimmung des Wellendurchmessers wird anhand der höher belasteten Antriebswelle durchgeführt. Hierzu werden zunächst die Querkraft- und Biegemomentenverläufe (siehe Abbildung 82 und Abbildung 83) anhand der wirkenden Kräfte bestimmt. Der Biegemomentenverlauf zeigt den höchstbelasteten Bereich der Welle an der Lagerstelle der kleinen Zahnriemenscheibe.

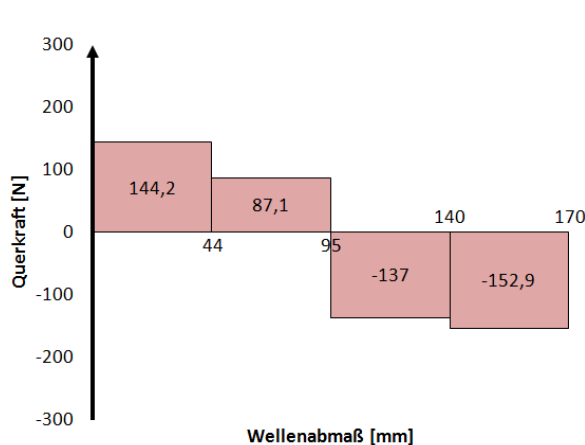


Abbildung 82 Querkraftverlauf der Antriebswelle

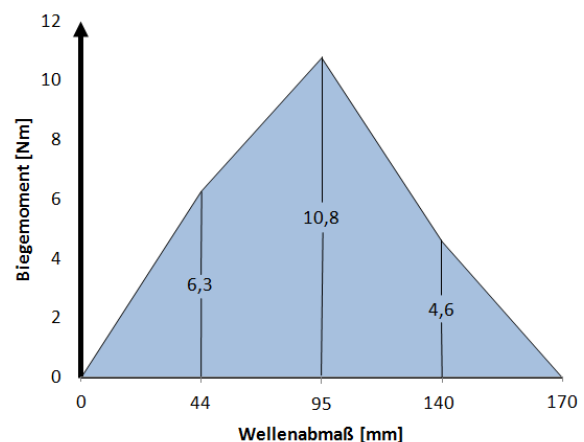


Abbildung 83 Biegemomentenverlauf der Antriebswelle

Zur Ermittlung des minimalen Wellendurchmessers wird das Vergleichsmoment an der höchst belasteten Stelle bestimmt. Neben dem Biegemoment wirkt dort zusätzlich das Torsionsmoment des Zahnriemenantriebs. Dieses beträgt an dieser Stelle:

$$T = 9550 * \frac{K_A * P}{n} = 9550 * \frac{1,1 * 0,055 \text{ kW}}{90 \text{ min}^{-1}} = 6,4 \text{ Nm}$$

Das Vergleichsmoment wird mit folgender Formel berechnet:

$$M_V = \sqrt{M_b^2 + \left( \frac{\sigma_{bzul}}{2 * \tau_{tzul}} * T \right)^2}$$

Als Werkstoff wird von einem unlegierten Vergütungsstahl C45 ausgegangen, welcher eine zulässige Biegespannung von  $350 \text{ N/mm}^2$  und eine zulässige Torsionsspannung von  $210 \text{ N/mm}^2$  aufweist. Durch Eingabe der Werte ergibt sich das Vergleichsmoment zu  $12 \text{ Nm}$ . Bei einem gewählten Sicherheitsfaktor von vier berechnet sich der Wellendurchmesser nach folgender Formel:

$$d = 3,4 * \sqrt[3]{\frac{M_V}{\sigma_{bzul}}} = 11,1 \text{ mm}$$

Bei der Auslegung der Antriebswelle ist von einem minimalen Entwurfsdurchmesser von  $11,1 \text{ mm}$  auszugehen.

### 5.3.5 Lebensdauerberechnung der C-Schienenführung

Zur Führung der Kühllamellen werden sogenannten C-Schienenführungen der Fa. item verwendet. Diese sind speziell für den Anwendungsfall von kompakten Hub- und Schiebetürsystemen konzipiert. Das Schienensystem besteht aus einer Schienenführung und einem Führungsschlitten, welcher durch eine kugelgelagerte Führungsrolle auf zwei in der Schienenführung aufgepressten Führungswellen geführt wird (siehe Abbildung 84).

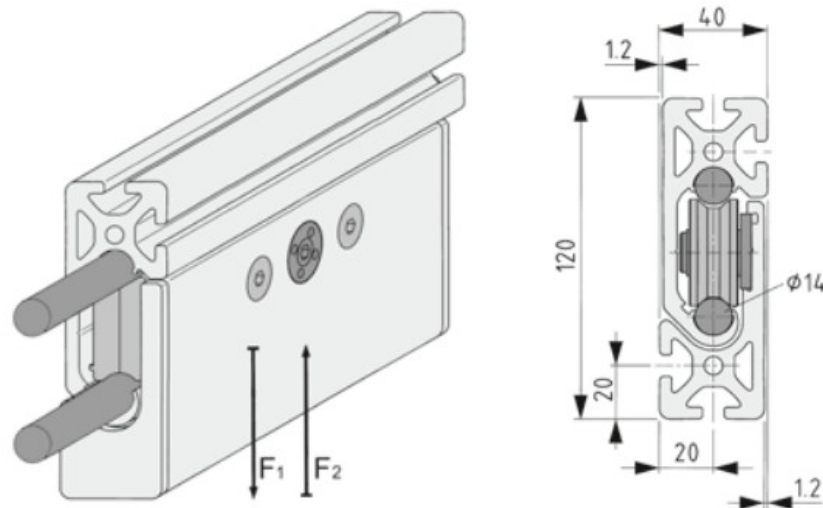


Abbildung 84 C-Schienenführung der Fa. item [26]

Die Lebensdauerberechnung der C-Schienenführung ist analog zu einer Lebensdauerberechnung eines Wälzlagers. Zuerst sind die wirkenden axialen und radialen Kräfte zu bestimmen. Erstere sind nicht vorhanden, sodass die Wälzlagerung in den Führungsrollen lediglich radial belastet wird. Die Radialbelastung ergibt sich aus der Gewichtskraft und der resultierenden Kraft aus dem Antriebsmoment und dem Trägheitsmoment.

$$P = X * F_r = 1 * (F_{G/2} + F_{M/2}) = 200 \text{ N} + 126,55 \text{ N} = 326,55 \text{ N}$$

Die Wahl für die Lagereinheit fiel auf den Typ "8 D14 1R" mit einer dynamischen Tragzahl C von 6200 N. Aufgrund des hohen Eigengewichts der Kühl lamellen ist die Wahl einer kleineren Schienenführung nach Angaben des Herstellers nicht möglich. Die Lebensdauer in km wird mit der Formel

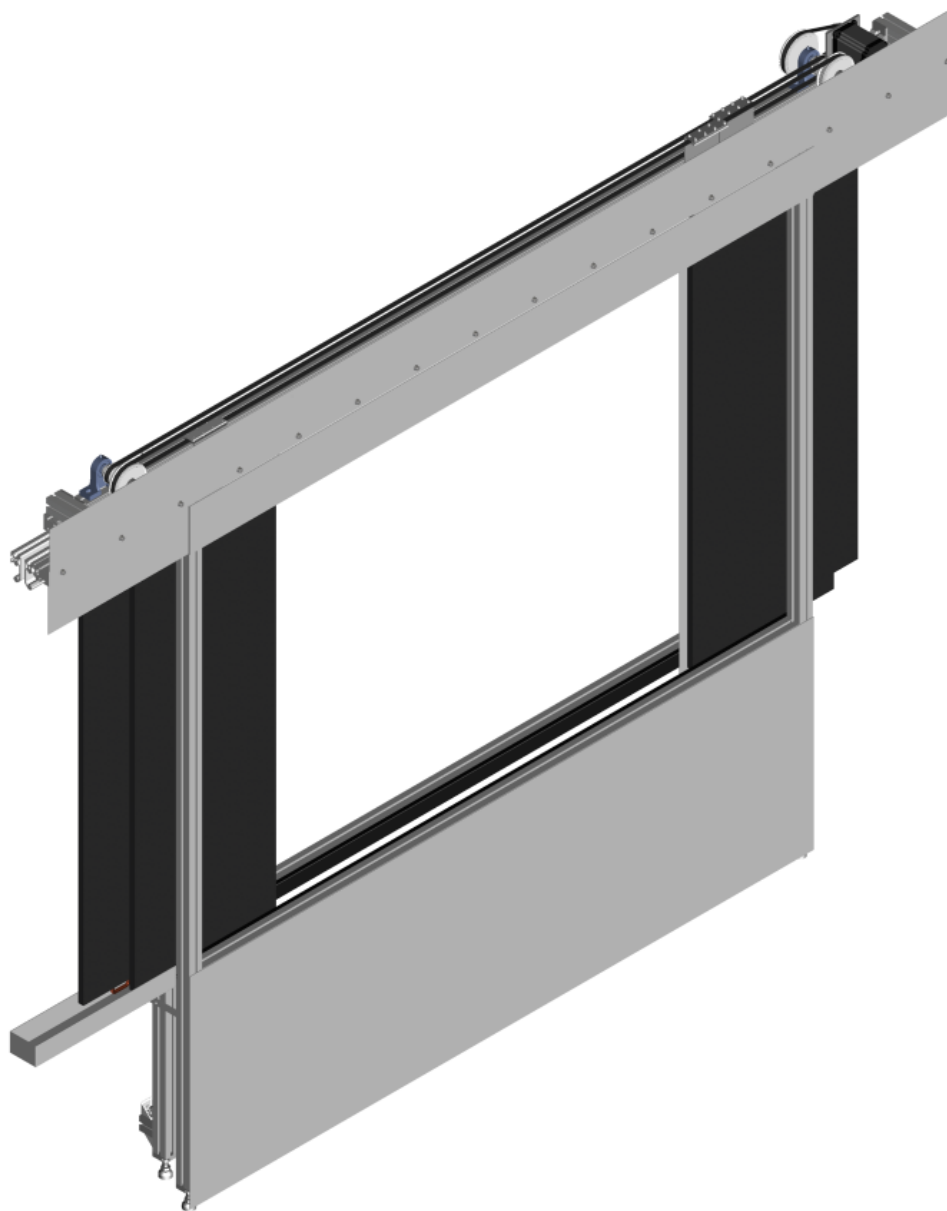
$$L = \left( \frac{C}{P} \right)^3 * 100$$

berechnet und beläuft sich auf 684425 km. Bei einer geschätzten täglichen Laufleistung von 50 m ist die C-Schienenführung ausreichend dimensioniert.



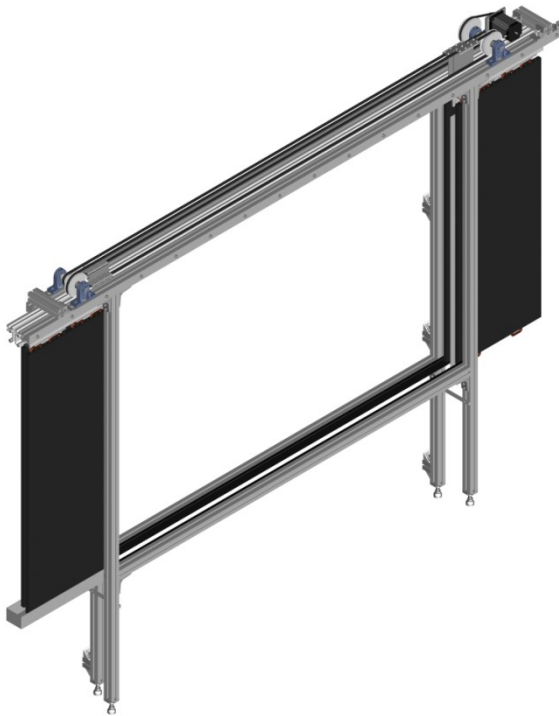
## 5.4 Ausarbeitung

Nachfolgend ist das auskonstruierte CAD-Modell zu sehen (siehe Abbildung 85). Die Ansicht zeigt den Teleskopshutter vom Strahlerraum aus. Zum Schutz vor der hochintensiven UV-Strahlung werden die Kühlschläuche und die Zahnriemen mittels Blechen verdeckt.

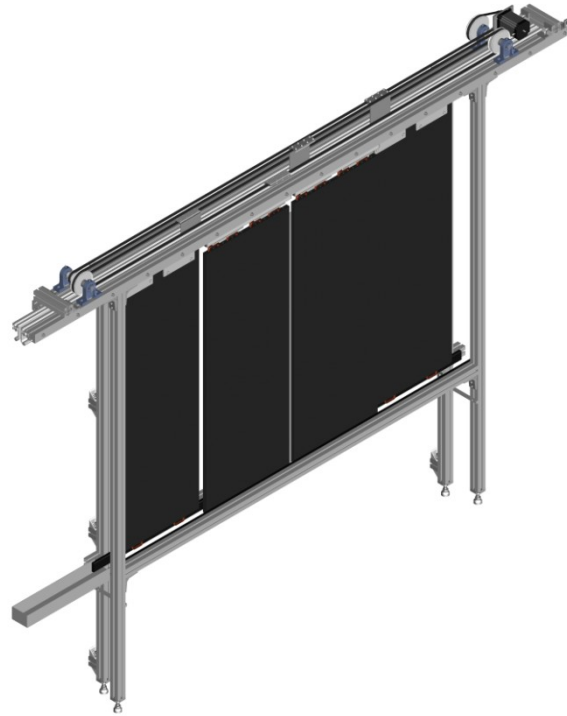


**Abbildung 85 Ausgearbeitetes CAD-Modell**

Im geöffneten Zustand werden die Kühllamellen seitlich des Gestells positioniert (siehe Abbildung 86). Soll der Shutter verschlossen werden, fahren die Lamellen zur Mitte bis die Durchtrittsöffnung vollständig geschlossen ist (siehe Abbildung 87).

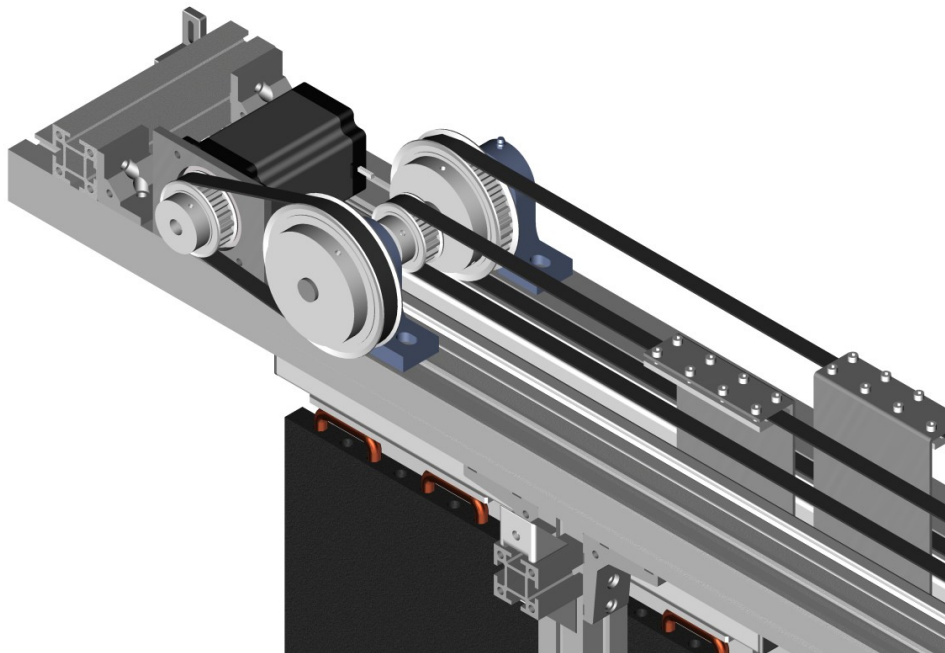


**Abbildung 86 Teleskopshutter im geöffneten Zustand (Blechabdeckungen ausgeblendet)**



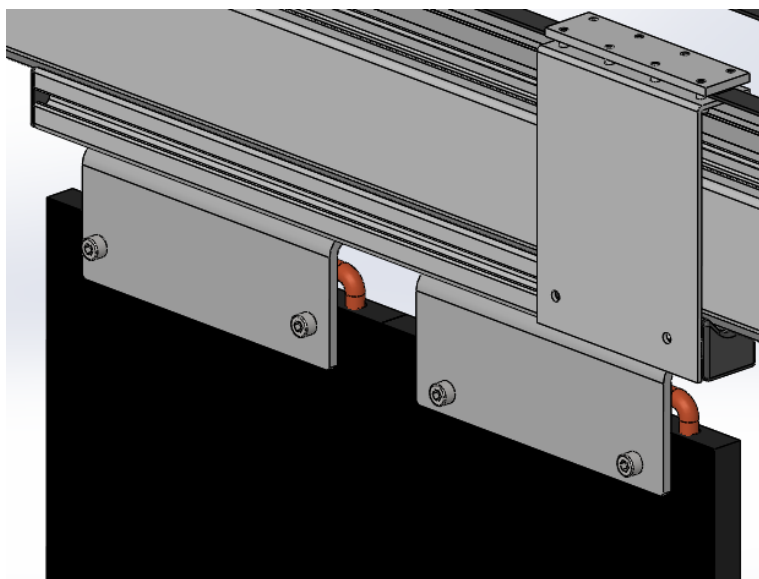
**Abbildung 87 Teleskopshutter im geschlossenen Zustand (Blechabdeckungen ausgeblendet)**

Aus Kostengründen besteht jede Kühllamelle aus zwei gekühlten Platten welche an der Schlittenführung aneinander montiert werden. Der Hersteller "Daub CNC Technik GmbH und Co KG" hat die schmalere Kühlelemente zu einem deutlich günstigeren Preis als der Hersteller "austerlitz electronic GmbH" angeboten, welcher die Kühlelemente auch in breiteren Ausführungen anbietet (siehe Angebote im digitalen Anhang). Die Antriebseinheit hat sich dahingehend verändert, dass kein zusätzliches Getriebe mehr vorhanden ist (siehe Abbildung 88). Die Zahnriemenscheibe wird direkt auf die Motorwelle gesetzt, welche über eine ausreichende Lagerung verfügt. Mit einem Übersetzungsverhältnis von 2 wird das Drehmoment auf die Antriebswelle übertragen. Die Antriebswelle wird auf den in blau dargestellten Lagerböcken gelagert. Auf der Antriebswelle sitzen zudem die beiden Zahnriemenscheiben zum Antrieb der Kühllamellen. Zur Positionierung der Zahnriemenscheiben ist die Antriebswelle entsprechend abgestuft (siehe Fertigungszeichnung im Anhang). Die verschiedenen Wellendurchmesser ergeben sich aufgrund der zur Verfügung stehenden Konfigurationsmöglichkeiten der Zahnriemenscheiben beim Lieferanten "MISUMI Europe GmbH". Die Lagereinheit auf der motorabgewandten Seite wird als Festlager definiert. Über eine Madenschraube in der Wellenaufnahme wird die Welle fixiert. Die motorzugewandte Lagereinheit wird als Loslager definiert.



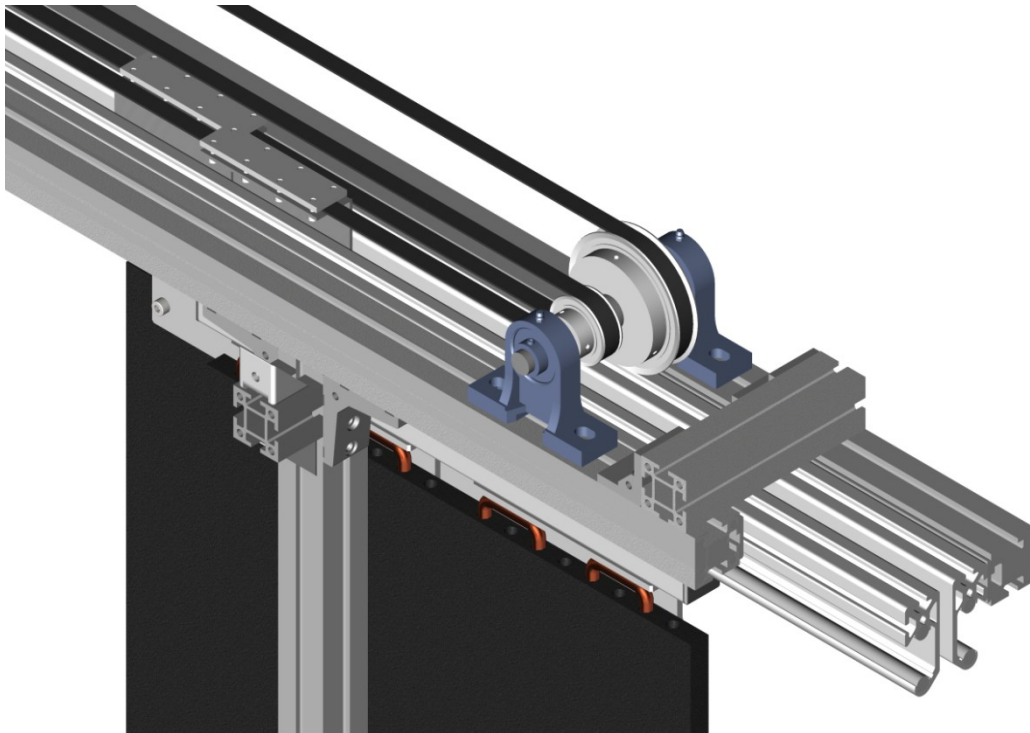
**Abbildung 88 Ausschnitt der Antriebseinheit**

Die Kühllamellen werden mittels Befestigungswinkel am Schlittenprofil verschraubt. Die Blechwinkel zur Befestigung des Zahnriemens werden an den vorgesehenen Nuten des Schlittenprofils geschraubt. Mittels der Anschraubklemmen wird der Zahnriemen mit dem Blechwinkel verschraubt (siehe Abbildung 89). Da die Zahnriemen auf verschiedenen Höhen verlaufen, ist für jede Kühllamelle ein individuelles Blech vorgesehen (Fertigungszeichnungen im Anhang).



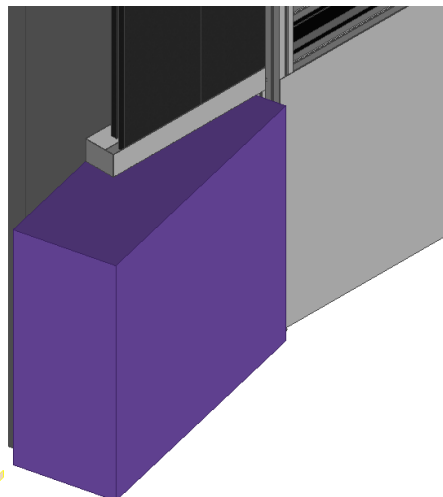
**Abbildung 89 Anbindung der Kühllamellen an den Führungsschlitten und dessen Anbindung an den Zahnriemen (andere Führungsschiene ist ausgeblendet)**

Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich die Umlenkeinheit (siehe Abbildung 90). Diese ist nahezu identisch mit der Antriebseinheit. Die Welle zur Aufnahme der Zahnriemenscheiben wird lediglich verkürzt, da hier die Zahnriemenscheibe zur Kraftübertragung des Motors entfällt (siehe technische Zeichnung im Anhang).



**Abbildung 90 Ausschnitt der Umlenkeinheit**

Da sich die Kühllamellen im geöffneten Zustand über einen Schaltkasten befinden, ist eine Auffangwanne vorgesehen (siehe Abbildung 91). Im Falle einer Leckage der Kühlwasserein- und -ausgänge der Kühllamellen wird das austretende Wasser abgeführt und größerer Schaden an der Elektronik vermieden.



**Abbildung 91 Auffangwanne; Schaltschrank lilafarben dargestellt**

Eine Auflistung aller Komponenten mit Herstellerangaben und Kosten befindet sich im Produktstrukturplan (siehe digitaler Anhang). Des Weiteren befinden sich die technischen Fertigungszeichnungen zu der Antriebswelle, der Umlenkwellen, den vier Blechhalterungen, der Motorhalterung und der Auffangwanne im Anhang. Die übrigen Komponenten konnten fertig zugekauft werden und benötigen daher keine technische Fertigungszeichnung. Die dazugehörigen Angebote sind ebenfalls im Anhang hinterlegt.

## 6 Softwareentwicklung

Die Ansteuerung des Shutters soll mittels einer grafischen Programmoberfläche erfolgen. Es ist auf eine einfache Bedienung Wert zu legen, sodass keine umfangreiche Einarbeitung zur Bedienung des Shutters erforderlich ist. Da die bisherige Anlagensteuerung auf LabVIEW<sup>®</sup> basiert und die Shuttersteuerung darin integriert werden soll, erfolgt die Programmierung ebenfalls mit LabVIEW<sup>®</sup>.

LabVIEW<sup>®</sup> basiert auf einer grafischen Programmiersprache. Die Erstellung des Programms erfolgt auf zwei Ebenen. Das Frontpanel, oder die Bedieneroberfläche, bildet die Schnittstelle zwischen der Software und dem Bediener. Diese dient der Datenerfassung und der Dateneingabe. Beispielsweise können Schaltflächen oder Statusanzeigen platziert werden, worüber der Bediener eine Anlage steuern und gleichzeitig Messwerte auslesen kann. Die zweite Ebene stellt das sogenannte Blockdiagramm dar. Das Blockdiagramm enthält den grafischen Programmcode. Die auf dem Frontpanel eingefügten Bedien- und Anzeigeelemente finden sich entsprechend symbolisch im Blockdiagramm wieder und können nach Belieben miteinander verknüpft werden.

Zur Ansteuerung des Motors wird die von der Fa. Nanotec bereitgestellte Motorsteuerung "SMCI47-S" verwendet (siehe Abbildung 92). Die Ansteuerung des Motors erfolgt durch verschiedene Variablen, die der Motorsteuerung übergeben werden. Die Definition der verschiedenen Variablen sind dem beigefügten Programmierhandbuch im digitalen Anhang zu entnehmen. Zur Ansteuerung mittels LabVIEW<sup>®</sup> werden von Nanotec bereits vorkonfigurierte Funktionsblöcke bereitgestellt.



Abbildung 92 Motorsteuerung SMCI47-S [27]



## 6.1 Bedieneroberfläche

Nachfolgend ist die Bedieneroberfläche bzw. das Frontpanel der Shuttersteuerung ersichtlich (siehe Abbildung 93).

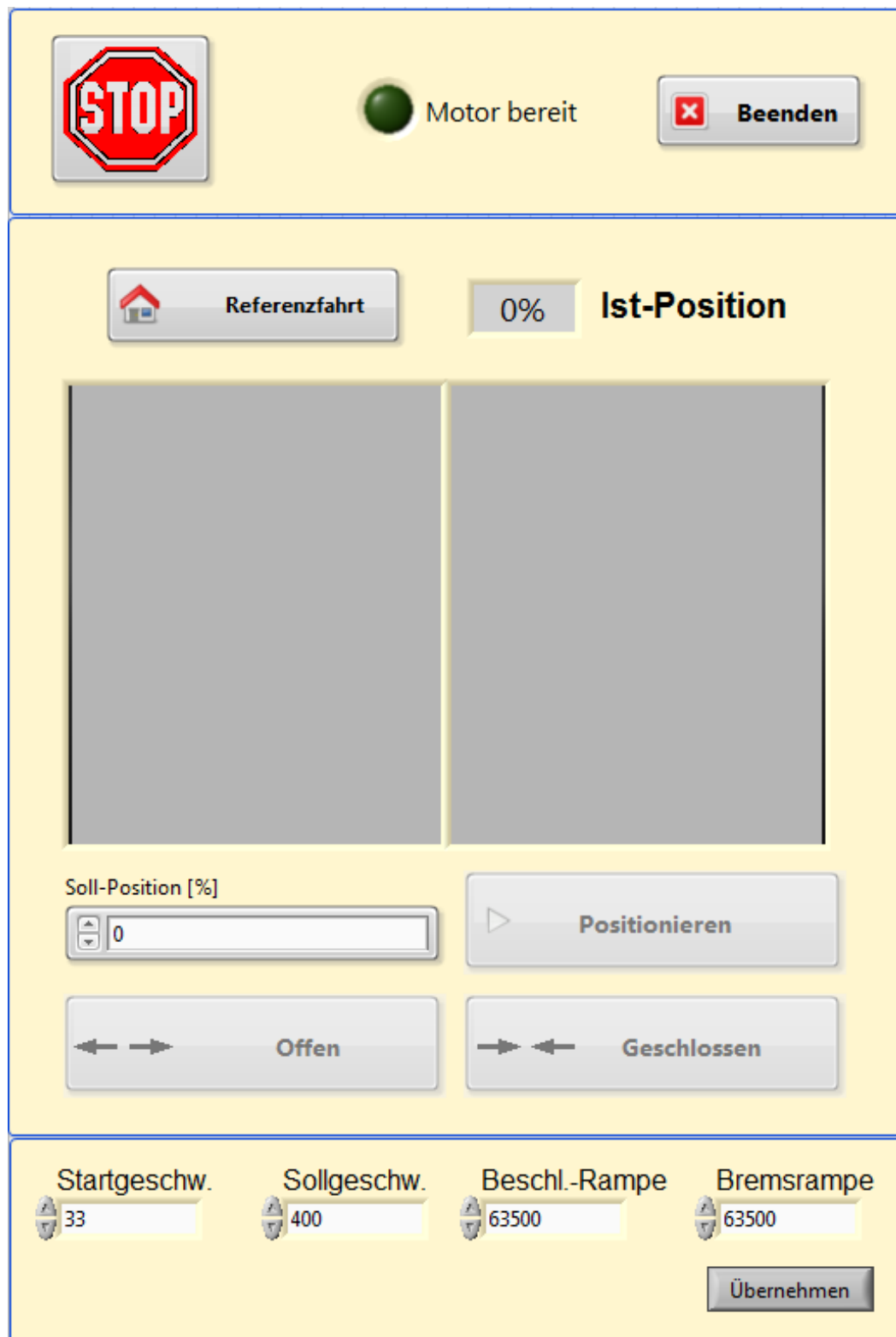
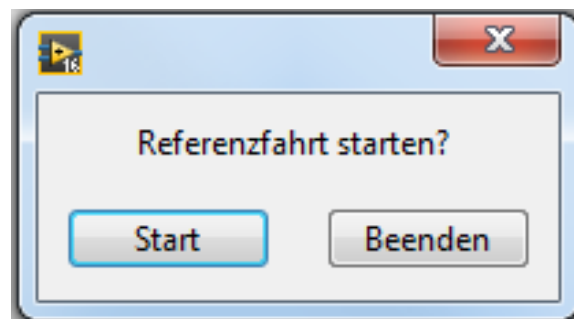


Abbildung 93 Bedieneroberfläche des Shutters

Im oberen Bereich befindet sich eine STOP-Schaltfläche, welche einen sofortigen Stopp des Motors einleitet, eine Statusanzeige, welche die Bereitschaft des Motors signalisiert und eine Beenden-Schaltfläche, welche die Programmoberfläche schließt.

Der mittlere Block enthält die Bedien- und Anzeigeelemente zur Steuerung des Shutters. Über die Schaltfläche Referenzfahrt wird eine solche eingeleitet. Hierzu ist ein Endschalter vorgesehen, welcher in vollständig geöffneten Position betätigt wird. Da der Software beim Start des Programms keine Information zur aktuellen Position vorliegt, erfolgt eine automatische Abfrage zum Start der Referenzfahrt (siehe Abbildung 94). Da bis zum Abschluss der Referenzfahrt keine Normalfahrt erfolgen darf, sind die Steuerungsschaltflächen vorerst ausgegraut und werden erst nach Abschluss der Referenzfahrt aktiv geschaltet. Die Statusanzeige der IST-Position wird prozentual und grafisch über zwei gegenläufige Anzeigebalken dargestellt.

Im unteren Bereich können Veränderungen am Fahrprofil des Motors vorgenommen werden. Da die voreingestellten Werte über Versuche ermittelt wurden, sollten Veränderungen an diesen nur durch erfahrenes Personal vorgenommen werden. Bei Bedarf kann dieser Block auch entfallen.



**Abbildung 94** Abfrage zum Start einer Referenzfahrt bei Programmstart

Soll nach der erfolgten Referenzfahrt eine bestimmte Position angefahren werden, kann die gewünschte Soll-Position in Prozentangaben eingegeben werden. Über die Betätigung der Schaltfläche "Positionieren" verfahren die Kühllamellen auf die gewünschte Position (siehe Abbildung 95). Die aktuelle Position des Shutters wird anschließend mittels der Statusanzeigen dargestellt (siehe Abbildung 96). Neben dieser Verfahrensweise besteht die Möglichkeit, den Shutter über die Bedienflächen "Offen" und "Geschlossen" vollständig zu Öffnen oder zu Schließen. Die Positionierung erfolgt Absolut.

STOP Motor bereit Beenden

Referenzfahrt 0% Ist-Position

Soll-Position [%] 45 Positionieren

Offen Geschlossen

Startgeschw. 33 Sollgeschw. 400 Beschl.-Rampe 63500 Bremsrampe 63500 Übernehmen

Abbildung 95 Eingabe der gewünschten Sollposition

STOP Motor bereit Beenden

Referenzfahrt 45% Ist-Position

Soll-Position [%] 45 Positionieren

Offen Geschlossen

Startgeschw. 33 Sollgeschw. 400 Beschl.-Rampe 63500 Bremsrampe 63500 Übernehmen

Abbildung 96 Anzeige der erreichten Sollposition

Eine Bedienungsanweisung zur Programmoberfläche befindet sich im Anhang.

## 6.2 Blockdiagramme

Wird das Blockdiagramm in der Gesamtansicht betrachtet, besteht es aus mehreren ineinander verschachtelten Schleifen (siehe Abbildung 97). Im Folgenden soll das Blockdiagramm ausgehend von links erläutert werden.

Über die ersten beiden Blöcke wird die verwendete Schnittstelle und die Baudrate definiert. Das Nanotec-Sub-VI "OPEN VISA" öffnet und parametrisiert die Schnittstelle. Ein Sub-VI ist ein weiteres Unterblockdiagramm, welches der Übersicht halber als einzelner Block zusammengefasst ist. Der Inhalt der Sub-VIs ist im Anhang ersichtlich und soll hier nicht erläutert werden. Im anschließenden Sub-VI "CONFIG" wird die Drehrichtung des Motors festgelegt, die Endschalter definiert und die zuletzt gespeicherte Position des Shutters ausgelesen. Bevor die While-Schleife aktiviert wird, werden die Schaltflächen zum Verfahren des Shutters ausgegraut und deaktiviert.

Die While-Schleife wird solange durchlaufen, bis ein bestimmtes Ereignis diese beendet. Dieses Ereignis ist durch die Betätigung der "Beenden"-Schaltfläche auf dem Frontpanel oder Referenzabfahrtsabfrage definiert. Des Weiteren findet ein Abbruch beim Auftreten eines Fehlers in der Datenverarbeitung, als gelb-schwarze Linie im Blockdiagramm dargestellt, statt. Tritt keines dieser Ereignisse in Kraft wird zunächst der Status des Notstoppendschalter abgefragt. Neben dem bereits angesprochenen Referenzschalter ist ein weiterer Notstoppendschalter im geschlossenen Zustand vorhanden, welcher als Schutzvorrichtung dient und ein Zusammenfahren der Kühllamellen verhindern soll. Im Normalbetrieb sollte dieser nicht betätigt werden. Über das Nanotec-Sub-VI "WRITE READ" können Befehle in Form von Variablen an die Motorsteuerung geschickt und eine entsprechende Rückmeldung ausgelesen werden. In diesem Fall wird über die Variable "ZY" der Status der Endschalter abgefragt. Über diese Funktion wird der Status der Eingänge als Integerwert zurückgegeben. Bei der gewählten Konfiguration bedeutet ein Wert von 4, dass der Notstoppendschalter gedrückt ist.

Innerhalb der While-Schleife befindet sich eine sogenannte Case-Struktur. Dieses besteht aus zwei unterschiedlichen Unterdiagrammen. Über einen booleschen Auswahlanschluss wird das jeweilige Unterdiagramm ausgewählt. Im Normalbetrieb wird der "False"-Case ausgeführt, d.h. weder der Notstoppendschalter, die STOP-Schaltfläche oder die Beenden-Schaltfläche sind gedrückt, wie es ebenso nachfolgend abgebildet ist.

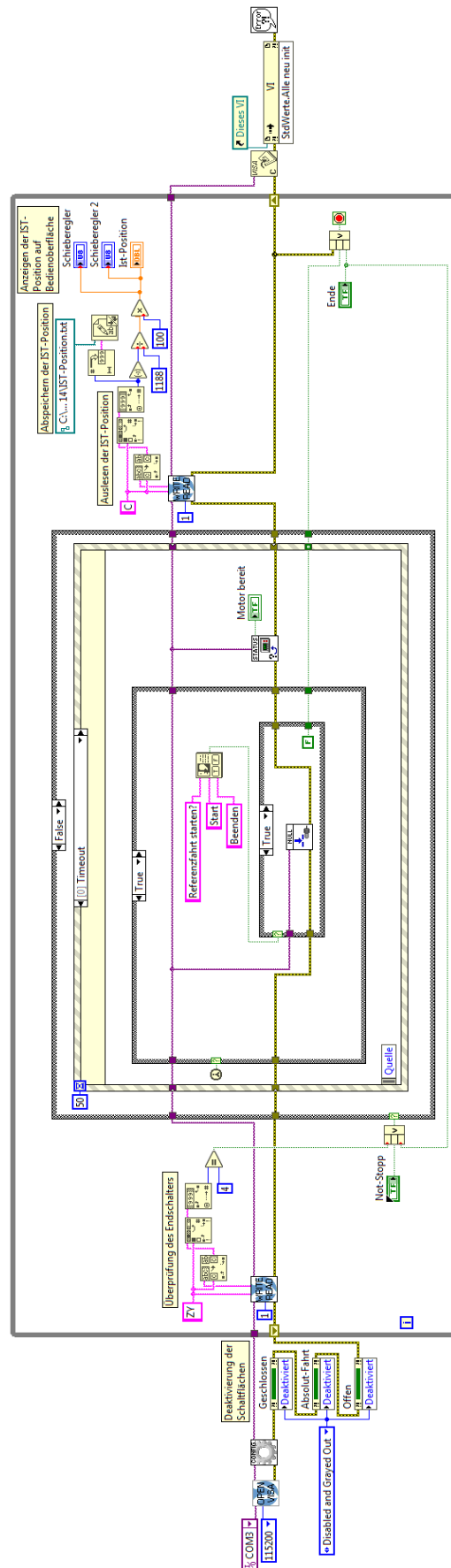
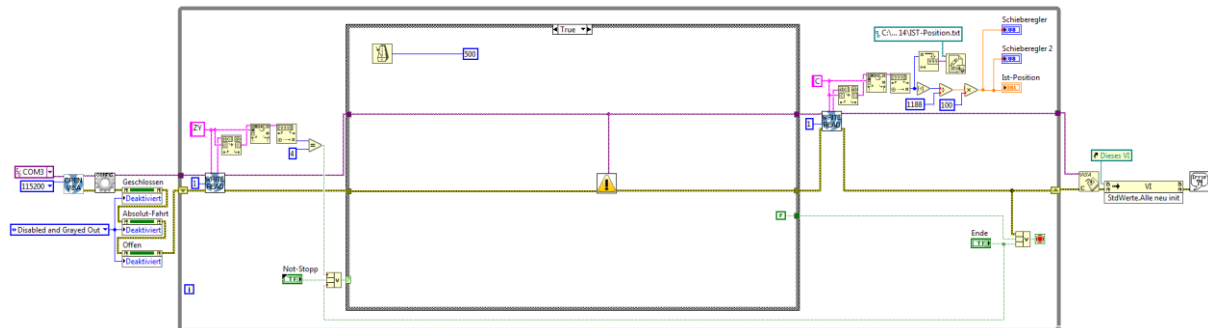


Abbildung 97 Gesamtansicht des Blockdiagramms in LabVIEW®

Wird eines der drei Ereignisse aktiv, schaltet die Case-Struktur auf das True-Case um (siehe Abbildung 98). In diesem Fall wird das Sub-VI "Quick Stop" durchlaufen, welches einen sofortigen Stopp des Motors einleitet.



**Abbildung 98 Gesamtansicht des Blockdiagramms beim "TRUE"-Case**

Wie bereits beschrieben wird im Normalbetrieb der False-Case ausgeführt. Dieser beinhaltet zunächst eine Ereignisstruktur. Die Ereignisstruktur enthält ähnlich wie die Case-Struktur mehrere Unterdiagramme, welche je nach Ausführung eines zuvor definierten Ereignisses ausgeführt werden. Ist kein Ereignis aktiv wird der Case "Timeout" ausgeführt (siehe Abbildung 99). Hierin wird zunächst eine weitere Case-Struktur durchlaufen, in der abgefragt wird, ob es sich um den ersten Start handelt. Wenn Ja, dann wird der Case "True" aktiviert und es folgt die Abfrage "Referenzfahrt starten?" bei der das entsprechende Fenster dem Bediener erscheint. Bei Betätigung der Schaltfläche "Starten" wird ein boolescher True-Wert an eine weitere Case-Struktur gegeben, welche in diesem Fall das Sub-VI "Referenzfahrt" durchläuft. Eine Referenzfahrt ist von der Motorsteuerung definiert und beinhaltet die Fahrt auf einen zuvor definierten Referenzschalter und das selbständige Herunterfahren von diesem. Anschließend wird die aktuelle Position als Nullposition gespeichert. Wird die Schaltfläche "Beenden" betätigt, wird im False-Case eine True-Variable zum Beenden des Programms ausgegeben. Zum Abschluss werden die beiden Case-Strukturen verlassen und über das Sub-VI "STATUS" der Status des Motors abgefragt. Liegen keine Probleme vor, leuchtet die Statusanzeige auf dem Frontpanel grün.

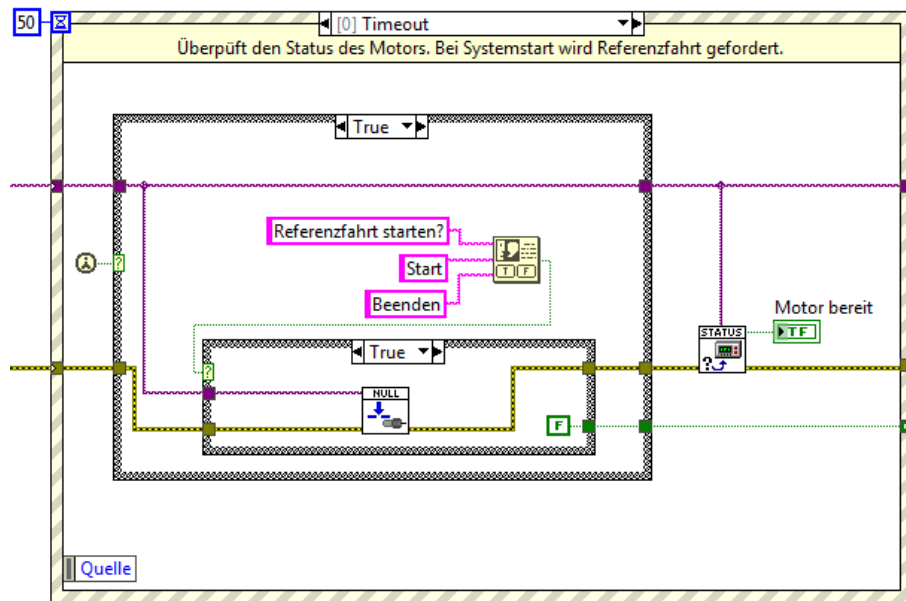


Abbildung 99 Ereignisstruktur; Case: Timeout; Erster Start: True

Handelt es sich nicht um den ersten Durchlauf, wird der False-Case ausgeführt. Dieser dient dazu, die deaktivierten Schaltflächen zur Bedienung des Shutters zu aktivieren. Hierzu wird die aktuelle IST-Position des Shutters ausgelesen. Ist die Nullposition nach der Referenzfahrt erreicht werden in einer Case-Struktur die Schaltflächen aktiviert und die zuvor ermittelten Fahrprofil-Werte ins Frontpanel eingetragen. Im False-Case geschieht entsprechend nichts und die Schaltflächen bleiben ausgegraut.

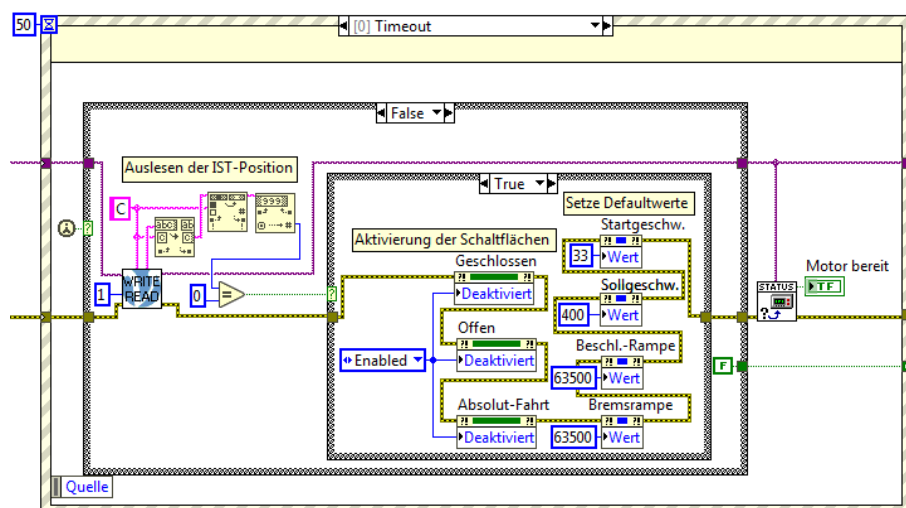


Abbildung 100 Ereignisstruktur; Case: Timeout; Erster Start: False

Nach Beendigung der Referenzfahrt kann über die Schaltfläche "Positionieren" der Case "Absolut-Fahrt" ausgeführt werden (siehe Abbildung 101). Dieser beinhaltet das Sub-VI "Absolutfahrt", welches nach Eingabe der Sollposition in Prozent die gewünschte Anzahl an Schritten absolut verfährt.



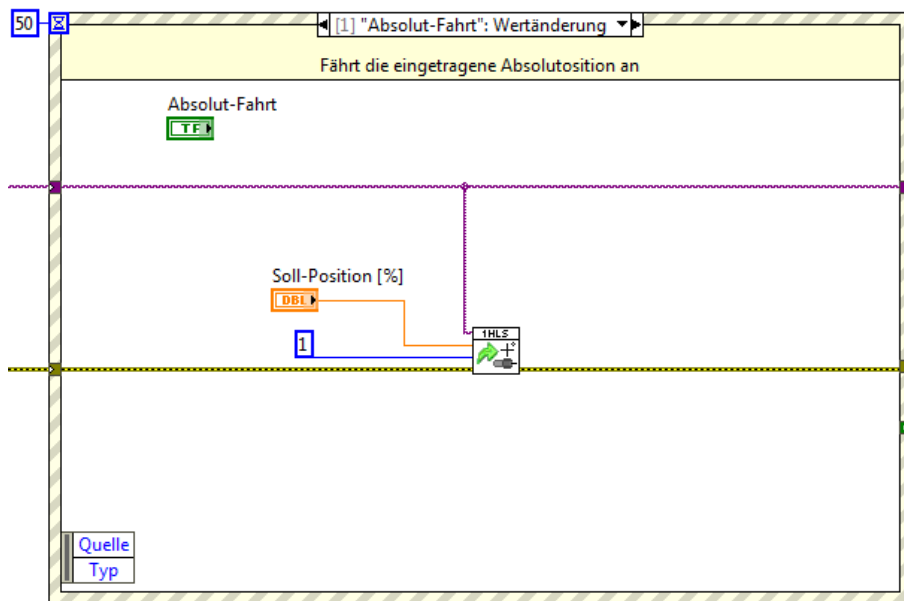


Abbildung 101 Ereignisstruktur; Case: Absolut-Fahrt

Soll während des Betriebs eine zusätzliche Referenzfahrt durchgeführt werden, kann über die Schaltfläche "Referenzfahrt" der gleichnamige Case aktiviert werden (siehe Abbildung 102). Dieser beinhaltet ebenfalls das Sub-VI "Referenzfahrt" und verfährt nach dem bereits beschriebenen Schema auf den Nullpunktendschalter.

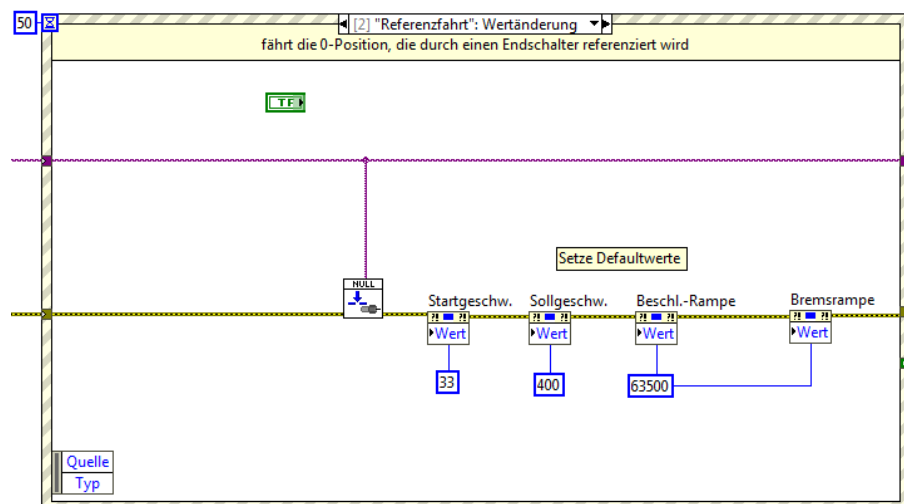


Abbildung 102 Ereignisstruktur; Case: Referenzfahrt

Durch Betätigung der Schaltfläche "Offen" wird der gleichnamige Case durchlaufen. In diesem wird das Sub-VI "AUF" durchlaufen bei dem die zuvor referenzierte Nullposition angefahren wird (siehe Abbildung 103).

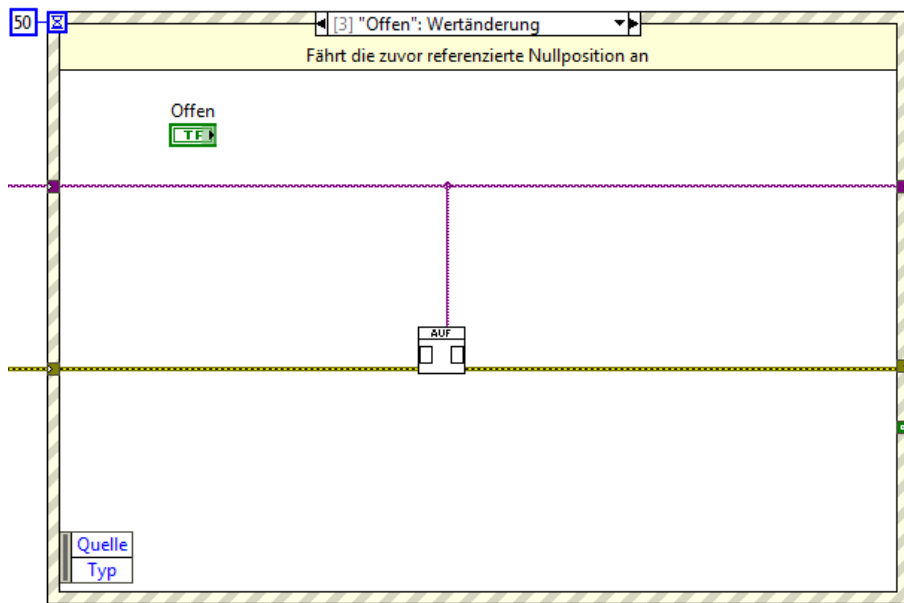


Abbildung 103 Ereignisstruktur; Case: Offen

Bei Betätigung der Schaltfläche "Geschlossen" wird das Sub-VI "ZU" ausgeführt (siehe Abbildung 108). Hierbei verfährt der Motor die Kühllamellen in den geschlossenen Zustand. Die Anzahl an Motorschritten zum vollständigen Schließen des Shutters sind zuvor experimentell ermittelt worden.

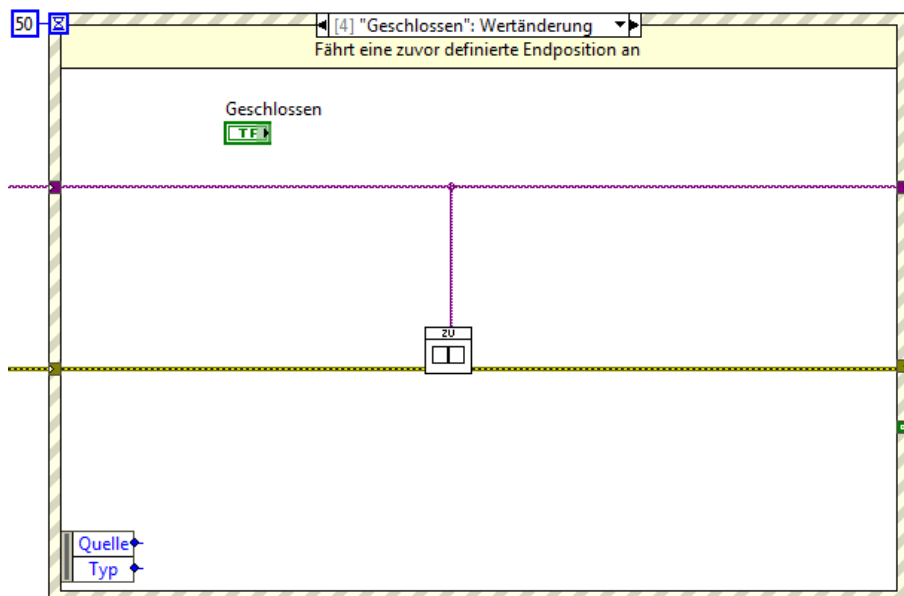


Abbildung 104 Ereignisstruktur; Case: Geschlossen

Der letzte Case wird bei einer Wertänderung der Fahreigenschaften des Motors über die Schaltfläche "Übernehmen" aktiviert (siehe Abbildung 105). Hierbei werden die eingestellten Parameter mittels entsprechender Variablen über das Nanotec-Sub-VI "WRITE READ" an die Motorsteuerung übergeben.

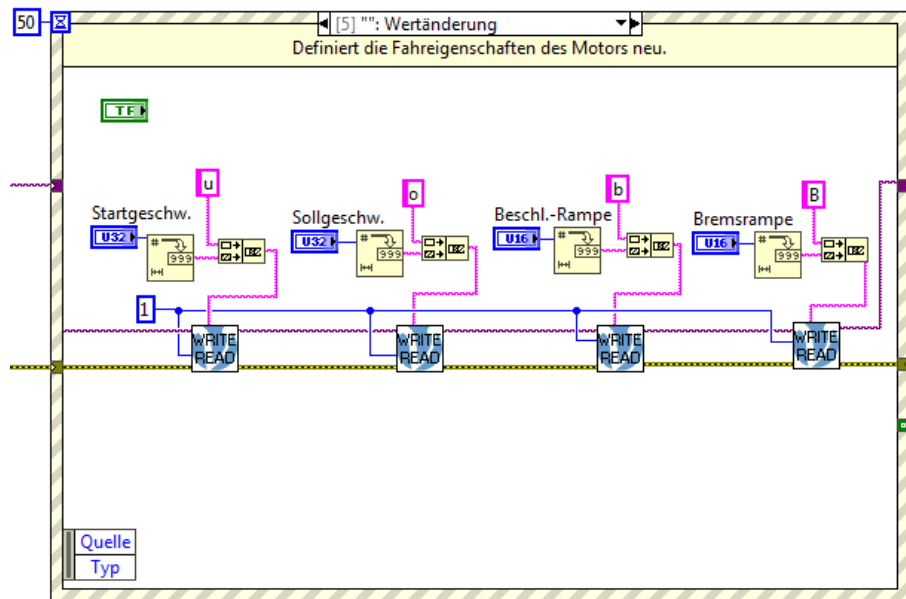


Abbildung 105 Ereignisstruktur; Case: Wertänderung

Nach dem Durchlaufen der Ereignisstruktur wird im hinteren Teil der While-Schleife die aktuelle Position des Motors ausgelesen (siehe Abbildung 106). Diese wird in eine Text-Datei gespeichert und beim nächsten Start des Programms im Sub-VI "CONFIG" wieder ausgelesen. Darüber hinaus wird eine Umrechnung der erfolgten Schritte in Prozentangaben durchgeführt und an die Anzeigen auf dem Frontpanel übergeben. Wie bereits beschrieben wird die While-Schleife bei Betätigung der Beenden-Schaltflächen oder beim Auftreten eines Fehlers beendet, woraufhin sich das Programm selbstständig schließt.

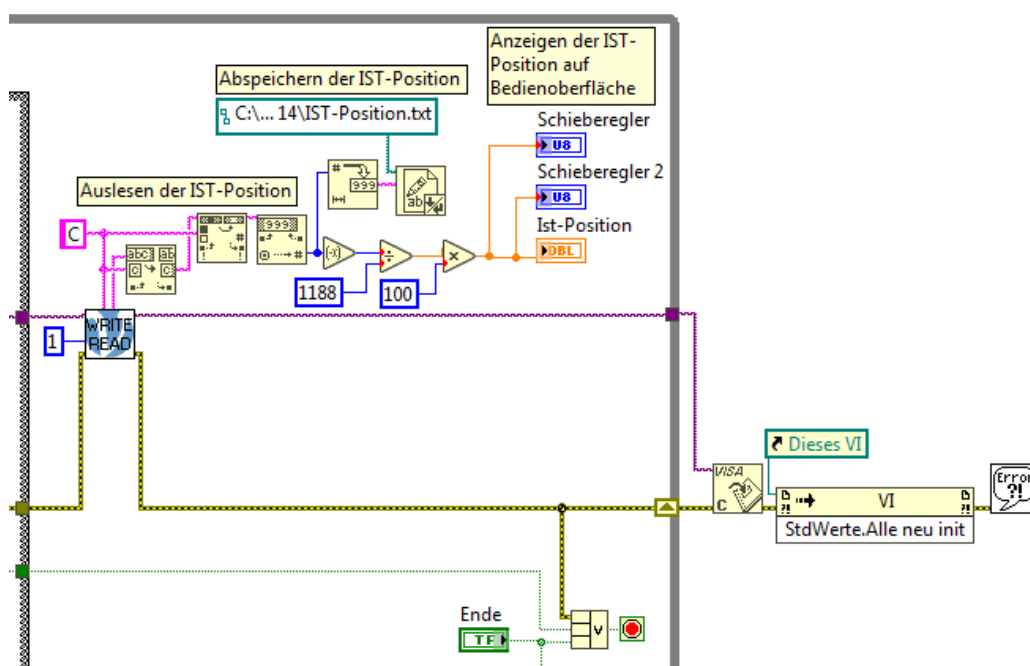


Abbildung 106 Ausschnitt aus der Gesamtansicht des Blockdiagramms

## 7 Aufbau und Inbetriebnahme

Zum Betreiben der Anlage ist im ersten Schritt ein Schaltschrank zusammengebaut worden (siehe Abbildung 107). Der Schrittmotor kann mit 24 und 48V und bis zu einem Betriebsstrom von 6,37A betrieben werden. Da die Leistung des Motors bei einer höheren Spannung steigt, ist ein 48V-Netzteil vorgesehen. Da die digitalen Eingänge der Motorsteuerung bis 24V ausgelegt sind, ist ein zusätzliches 24V-Netzteil vorhanden, welches über die Endschalter mit Motorsteuerung verbunden ist. Der Kondensator ist parallel zwischen dem 48V-Netzteil und der Motorsteuerung angeschlossen. Der Kondensator dient dazu, die beim Abbremsen des Schrittmotors zurückgewonnene Energie aufzunehmen. Ist dieser nicht vorhanden, können durch den erhöhten Spannungsanstieg Bauelemente des Netzteils zu Schaden kommen. Im unteren Bereich des Schaltschranks befindet sich ein Lüfter, welcher die kühle Luft einsaugt und über einen weiteren Austrittsfilter im oberen Bereich wieder ausgibt. Auf der Schaltschranktür befindet sich ein Hauptschalter zum An- und Ausschalten der Anlage (nicht abgebildet).

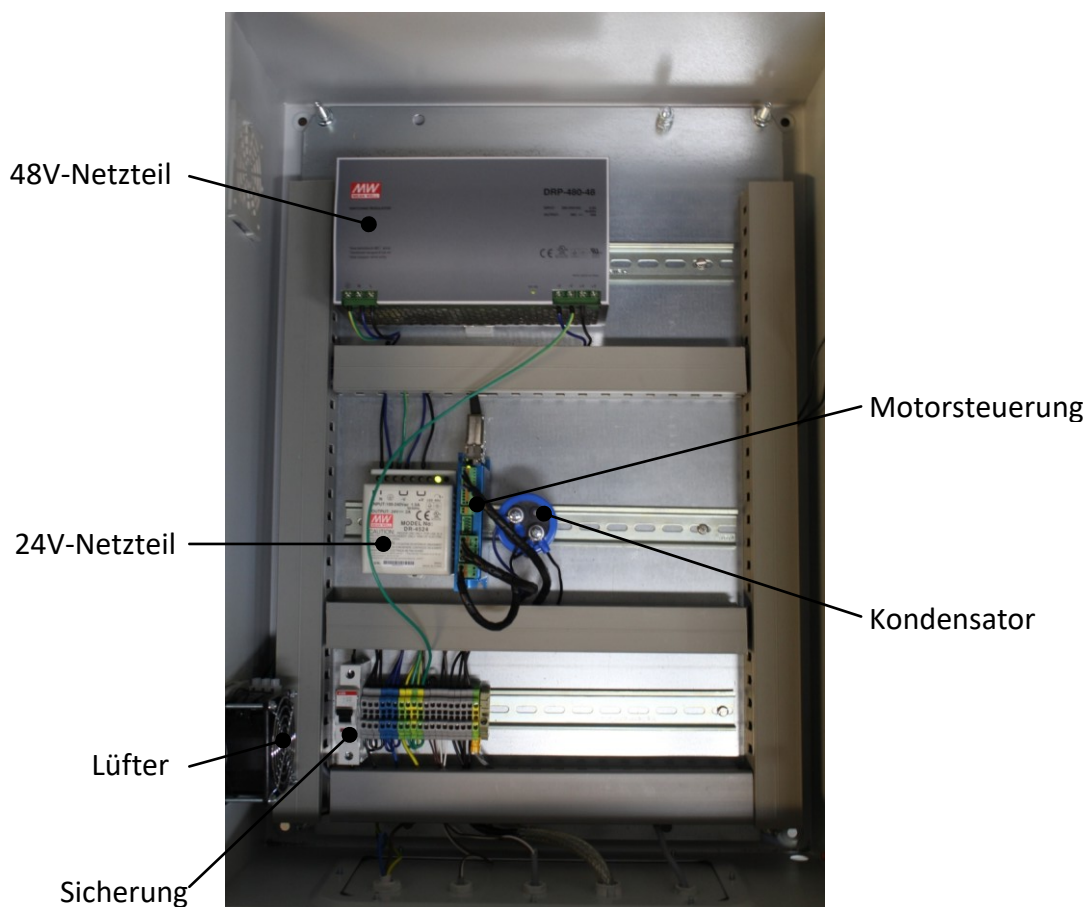


Abbildung 107 Schaltschrank

In einer vorläufigen Funktionsprüfung wurde der Antriebs- und Führungsteil der Anlage vorab außerhalb des Strahlers aufgebaut (siehe Abbildung 108). Hierzu wurden die Schienenführung an den Rahmen befestigt, die Schlittenführung aufgeschoben und die Antriebseinheit mitsamt der Zahnriemen vormontiert.



**Abbildung 108 Vormontierte Führungs- und Antriebseinheit**

In der Draufsicht sind die Endschalter ersichtlich (siehe Abbildung 109). Bei einer Referenzfahrt wird der mit einem "R" gekennzeichnete Endschalter über den Blechwinkel, welcher den Führungsschlitten mit dem Zahnriemen verbindet, überfahren. Der ungekennzeichnete Endschalter ist der Notstoppendschalter, welcher nur im Falle einer Fehlpositionierung betätigt wird.



**Abbildung 109 Draufsicht auf die vormontierte Führungs- und Antriebseinheit**



Nach einer erfolgreichen Funktionsprüfung (siehe Videodatei "Testbetrieb") konnte die Anlage im Anschluss im Strahler aufgebaut werden. Bevor die Kühl lamellen an die Schlittenführungen montiert wurden, sind diese auf der strahlerzugewandten Seite mit einer mattschwarzen Farbe bestrichen worden. Hierdurch werden die bereits beschriebenen Rückreflexionen unterbunden, welche das Strahlungsprofil der Ellipsoidspiegel negativ beeinflussen.



**Abbildung 110 Mit "Pyromark 1200" mattschwarz angestrichene Kühl lamellen**

Nachdem auch eine Funktionsprüfung mit eingehängten Kühl lamellen erfolgreich abgeschlossen werden konnte (siehe Videodateien "Testlauf 1 und 2"), ist im Anschluss eine Versuchsreihe mit angeschalteten Strahlern gestartet worden (siehe Abbildung 111).

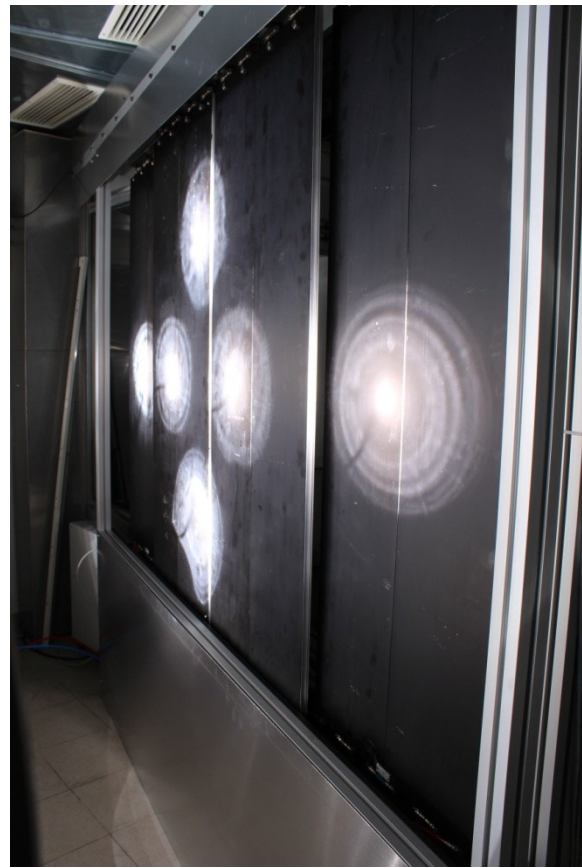


**Abbildung 111 Teleskopshutter im Betrieb**

Ziel der Versuchsreihe ist es, die entstehenden Temperaturen zu messen und die Funktion der Anlage im aufgeheizten Zustand zu überprüfen. Die Versuchsreihe wird mit verschiedenen Lampenkonfigurationen durchgeführt. Die Temperaturmessung erfolgt über eine Wärmebildkamera und einem Temperatursensor zur Ermittlung der Kühlwassertemperatur. Als erstes werden die Strahler A2, B2, B3 und C2 angeschaltet (siehe Abbildung 112). Hierbei hat sich eine Kühlwassertemperatur von  $33,1^{\circ}\text{C}$  und eine maximale Oberflächentemperatur der Kühllamellen von  $69,8^{\circ}\text{C}$  nach 15 Minuten eingestellt. Die nichtbestrahlten Bereich der Kühllamellen nehmen die Temperatur des Kühlwassers an. In einer zweiten Messung werden zusätzlich die äußeren Strahler B1 und B4 zugeschaltet (siehe Abbildung 113). Die Kühlwassertemperatur hat sich wieder nach 15 Minuten bei  $43,7^{\circ}\text{C}$  eingestellt. Die Maximale Oberflächentemperatur wurde bei  $72^{\circ}\text{C}$  gemessen.



**Abbildung 112** Testbestrahlung mit der Strahlerkonfiguration: A2, B2, B3, C2



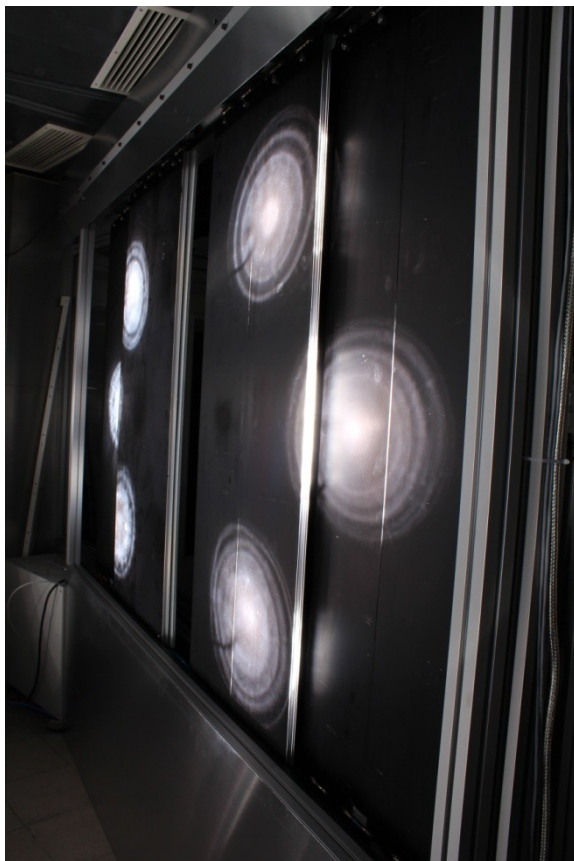
**Abbildung 113** Testbestrahlung mit der Strahlerkonfiguration: A2, B1, B2, B3, B4, C2

Bei einer oft verwendeten Lampenkonfiguration werden die äußeren 6 Strahler angeschaltet (siehe Abbildung 114). Eine Messung hat gezeigt, dass sich die Kühlwassertemperatur bei  $42,7^{\circ}\text{C}$  einstellt und die Oberflächentemperatur bis  $73,5^{\circ}\text{C}$  steigt.

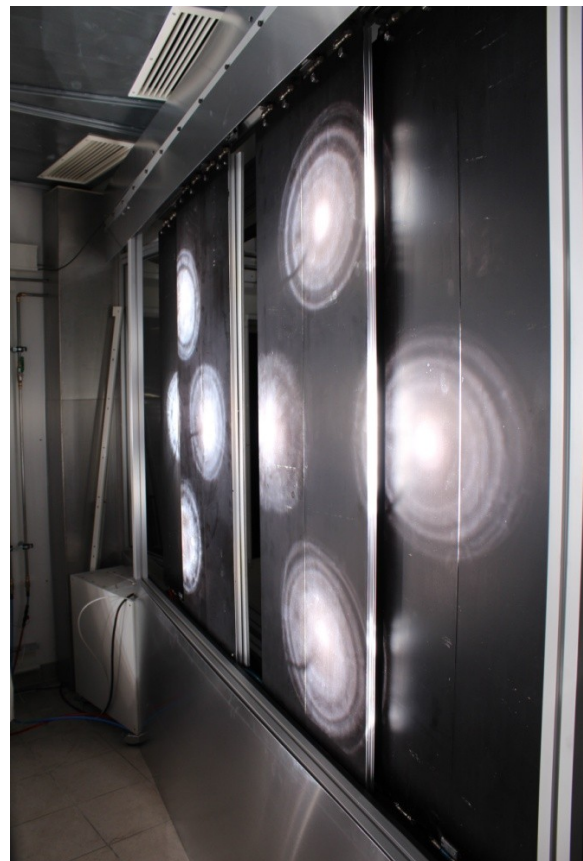


Wie zu erwarten liegen die Messergebnisse nahe der zuvor durchgeführten Messung. Dies ist zu erwarten, da bei beiden Messreihen eine gleiche Anzahl von Strahlern aktiviert wurde. Bei einer letzten Messreihe sind acht der zehn Strahler in Betrieb (siehe Abbildung 115). Nach einer Bestrahlungsdauer von 15 Minuten hat sich eine Kühlwassertemperatur von 53,4°C und eine maximale Oberflächentemperatur von 77°C eingestellt. Eine Funktionsprüfung ist im Anschluss erfolgreich verlaufen.

Die durchgeführten Messungen dienten einer Belastungsprüfung. Im späteren Praxisbetrieb sind solch intensive Bestrahlungen nicht vorgesehen. Eine 15-minütigen Dauerbestrahlung bei geschlossenem Shutter ist in der Praxis nicht vorhanden, da die Strahler vorher ausgeschaltet werden. Lediglich bei kurzzeitiger Ausblendung (ca. 1 Minute) bleiben die Strahler angeschaltet. Die Versuchsmessung hat jedoch gezeigt, dass auch bei dieser hohen thermischen Belastung der Shutter funktionstüchtig bleibt.



**Abbildung 114** Testbestrahlung mit der Strahlerkonfiguration: A1, A2, B1, B4, C1, C3



**Abbildung 115** Testbestrahlung mit der Strahlerkonfiguration: A1, A3, B1, B2, B3, B4, C1, C3

## 8 Fazit und Ausblick

Der Hochflussdichte-Sonnensimulator ist ein wichtiger Bestandteil des Instituts für Solarforschung am Standort Köln. Umso wichtiger ist die stetige Verbesserung dieser Anlage. Die durch diese Arbeit entstandene Abblendvorrichtung erlaubt eine feinere Leistungsregulierung und die Durchführung von kurzen aufeinanderfolgenden Bestrahlungsintervallen. Dies erweitert das Angebot an durchführbaren Experimenten. Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass ein Betrieb des Teleskopshutters ausschließlich nach der im Anhang befindlichen Betriebsanweisung erfolgen darf.

Bei der Ermittlung der Anforderungen hat sich gezeigt, dass bei den bisherigen Abblendvorrichtungen keine ausreichende Betriebssicherheit gegeben war. Der Nachteil der bereits im Einsatz gewesenen Lamellenshutter liegt zudem in der angestrahlten Restfläche, welche auch im vollständig geöffneten Zustand vorhanden ist. Eine weitere Problematik beim assymetrischen Lamellenshutter ergab sich in dem resultierenden assymetrischen Strahlungsprofil, da die Strahlung der Lampen ungleichmäßig ausgeblendet wird. Eine Weiterentwicklung führte zum symmetrischen Lamellenshutter, welcher aufgrund des aufwendigeren Antriebs jedoch keine ausreichende Betriebssicherheit aufwies. Ein Ausfall der Abblendvorrichtung hat im schlimmsten Fall eine Beendigung des zu dem Zeitpunkt laufenden Experimentes zur Folge. Deshalb wurde der Fokus der Entwicklung auf ein möglichst robustes System gelegt. Bei der Auswahl eines geeigneten Shutterdesigns kam diesem Punkt die höchste Bedeutung zu. Die bisher durchgeführten Testreihen mit der neuentwickelten Abblendvorrichtung haben gezeigt, dass auch bei intensiver Bestrahlung der Anlage eine Funktionstüchtigkeit gewährleistet ist.

Zur einfacheren Leistungsregulierung können im Anschluss an dieser Arbeit sogenannte Shutterfunktionen erstellt werden. Ähnlich wie beim Sonnenofen soll über die eingestellte Öffnungsposition eine zu erwartende Strahlungsleistung abgeschätzt werden. Diese ist in Abhängigkeit zur jeweiligen Lampenkonfiguration zu erstellen. Die in dieser Arbeit beschriebene Software ist als eigenständiges Programm entwickelt worden. Der Übersicht halber kann dieses ebenfalls in die bestehende Software der HLS-Steuerung integriert werden.

Zurzeit ist die Bedienung des Shutters nur vom Kontrollraum aus möglich. Zur Vereinfachung der Bedienung könnte in Folgeprojekten eine externe Ansteuerung vorgesehen werden. Denkbar wäre eine Art Fernbedienung, mit der entweder analog, z.B. über einen Drehregler,

---

oder digital, z.B: über entsprechende Taster, eine Bedienung des Shutters möglich ist. Hierdurch könnte das laufende Experiment von außerhalb des Kontrollraums beobachtet und gesteuert werden. Ein weiteres Folgeprojekt könnte sich mit der Einstellung von Bestrahlungszyklen über die Bedieneroberfläche befassen. Der Bediener könnte eine vorab definierte Folge von Öffnungsstellungen mit entsprechenden Verweildauern einstellen und anschließend automatisch ablaufen lassen.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] DLR.
- [2] „ESA,“ [Online]. Available: [http://www.esa.int/Highlights/Lunar\\_3D\\_printing](http://www.esa.int/Highlights/Lunar_3D_printing). [Zugriff am 06 10 2016].
- [3] N. Brandau, „Praktikumsbericht: Voretwicklung eines Hochleistungsstrahlers auf Basis von Xenon-Kurzbogenlampen,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln-Porz, 2006.
- [4] „Newport,“ [Online]. Available: [https://www.newport.com/medias/sys\\_master/images/images/h1b/h6c/8797681909790/BPT-pg12-18-Fig2-600w.gif](https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/h1b/h6c/8797681909790/BPT-pg12-18-Fig2-600w.gif). [Zugriff am 06 10 2016].
- [5] L. Hartmann, F. Frey und N. Schwarze, *Projektarbeit: Konstruktion eines Verschattungssystems für Sonnenofen und Hochleistungsstrahler*, Köln-Porz: Fachhochschule Köln, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2012.
- [6] C. A. Estrada, C. A. Arancibia-Bulnes, S. Vazquez, C. A. Pérez-Rábago, D. Riveros, R. Perez-Enciso, J. Quinones, R. Castejón, M. Montiel und F. Granados, *A NEW HIGH-FLUX SOLAR FURNACE AT CIE-UNAM IN TEMIXCO; MEXICO. FIRST STAGE*, CONACYT, UNAM.
- [7] „Plataforma Solar de Almería, Annual Report 2013,“ Ciemat P.S.A, 2013.
- [8] *KIRAN-42 High-Flux Solar Simulator*, iMdea energy.
- [9] H. Thomas, „SHUTTER APPARATUS FOR COLLIMATING X-RAYS“. USA Patent WO 95/10841, 12 Oktober 1993.
- [10] H. E. Koerner und E. W. Vaughn, „X-RAY SHUTTER APPARATUS“. USA Patent 3048700, 7 August 1962.
- [11] E. G. Hill, „SHUTTER PLATE MOVEMENT“. USA Patent 3980407, 17 Januar 1975.
- [12] G. Hansen und P. H. Keck, „Regelbare Blende für photometrische Einrichtungen zum Messen der Rückstrahlungen des Lichtes von festen Oberflächen“. DE Patent 716007, 4 September 1938.
- [13] R. Beeman und S. J. Brajkovich, „VARIABLE ORIFICE USING AN IRIS SHUTTER“. USA Patent 4094492, 18 Januar 1977.
- [14] W. Folger und U. Kinkel, „Blende mit größenveränderbarer Innenöffnung“. DE Patent

- DE 10 2005 004 262 A1, 28 Januar 2005.
- [15] „Baunetzwissen,“ [Online]. Available:  
[http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Sonnenschutz-Beschlagssystem-fuer-Faltschiebelaeden\\_4021919.html](http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Sonnenschutz-Beschlagssystem-fuer-Faltschiebelaeden_4021919.html). [Zugriff am 09 08 2016].
- [16] „Baunetzwissen,“ [Online]. Available:  
[http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Sonnenschutz-Elektrisch-betriebene-Faltscherenlaeden\\_2583033.html](http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Sonnenschutz-Elektrisch-betriebene-Faltscherenlaeden_2583033.html). [Zugriff am 09 08 2016].
- [17] „EControl-Glas GmbH & Co. KG,“ [Online]. Available: <https://www.econtrol-glas.de/de/knowledge-center/technologie/produktaufbau/>. [Zugriff am 16 01 2017].
- [18] „Variable Abschwächer,“ Laser Components GmbH.
- [19] „Austerlitz Electronic,“ [Online]. Available: [http://austerlitz-electronic.de/media/austerlitz\\_katalog/data/ae-Katalog12/index.html#](http://austerlitz-electronic.de/media/austerlitz_katalog/data/ae-Katalog12/index.html#). [Zugriff am 19 12 2016].
- [20] „Maschinenbau Kitz GmbH,“ [Online]. Available: <http://www.mk-group.com/produkte/lineartechnik-linearfuehrungen/laufrollenfuehrungen.html>. [Zugriff am 03 01 2017].
- [21] „item Industrietechnik GmbH,“ [Online]. Available:  
<http://product.item24.de/produkte/produktkatalog/products/c-schienen-systeme.html>. [Zugriff am 03 01 2017].
- [22] „Nanotec,“ [Online]. Available: <http://de.nanotec.com/produkte/566-st8918-schrittmotor-nema-34/>. [Zugriff am 20 12 2016].
- [23] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch und J. Voßiek, Roloff/Matek Maschinenelemente, Wiesbaden: Springer Vieweg, 21. Auflage.
- [24] „MISUMI Europe GmbH,“ [Online]. Available: <http://www.misumi-europe.com/de/catalog/vona2/detail/221000346064/?HissuCode=UCPH204&PNSearch=UCPH204&searchFlow=results2products&Keyword=UCPH204>. [Zugriff am 03 01 2017].
- [25] „MISUMI Europe GmbH,“ [Online]. Available: [http://www.misumi-europe.com/de/catalog/book/FYH1\\_SEA\\_01/digitalcatalog.html?page\\_num=5](http://www.misumi-europe.com/de/catalog/book/FYH1_SEA_01/digitalcatalog.html?page_num=5). [Zugriff am 03 01 2017].

- 
- [26] „item Industrietechnik GmbH,“ [Online]. Available:  
[http://catalog.item24.de/images/medienelemente/DOK/DATA/DOK\\_DATA\\_c-schienensystem\\_\\_SDE\\_\\_AIN\\_\\_V1.pdf](http://catalog.item24.de/images/medienelemente/DOK/DATA/DOK_DATA_c-schienensystem__SDE__AIN__V1.pdf). [Zugriff am 03 01 2017].
- [27] „Nanotec Electronic GmbH & Co. KG,“ [Online]. Available:  
<http://de.nanotec.com/produkte/1043-smci47-s-closed-loop-schrittmotorsteuerung/>.  
[Zugriff am 05 01 2017].

## Anhang

### A Allgemeines

Tabelle 10 Bewertungsbogen zur Nutzwertanalyse

Bewertungskriterien	Konzept 1: Faltdamellenshutter	
	Punkte	Kommentar
Robustheit / Betriebssicherheit		
Technischer Aufwand		
Zu erwartende Kosten		
Homogenität der Abschottung		
Zu erwartende Rückreflexionen		
Erfüllung der Kundenwünsche		
Bauraum / Erreichbarkeit		
Bewertungskriterien	Konzept 2: Partieller Shutter	
	Punkte	Kommentar
Robustheit / Betriebssicherheit		
Technischer Aufwand		
Zu erwartende Kosten		
Homogenität der Abschottung		
Zu erwartende Rückreflexionen		
Erfüllung der Kundenwünsche		
Bauraum / Erreichbarkeit		



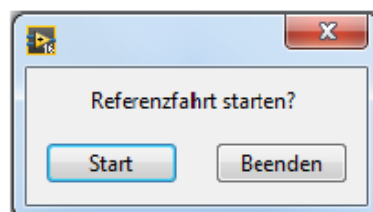
Bewertungskriterien	Konzept 3: Teleskopshutter	
	Punkte	Kommentar
Robustheit / Betriebssicherheit		
Technischer Aufwand		
Zu erwartende Kosten		
Homogenität der Abschottung		
Zu erwartende Rückreflexionen		
Erfüllung der Kundenwünsche		
Bauraum / Erreichbarkeit		
Bewertungskriterien	Konzept 4: Sym. Lamellenshutter	
	Punkte	Kommentar
Robustheit / Betriebssicherheit		
Technischer Aufwand		
Zu erwartende Kosten		
Homogenität der Abschottung		
Zu erwartende Rückreflexionen		
Erfüllung der Kundenwünsche		
Bauraum / Erreichbarkeit		

## Betriebsanweisung: Shutter



**Vor dem Betrieb des Shutters ist sicherzustellen, dass sich keine Person im Verfahrbereich des Shutters befindet!**

1. Beim Start des Programms ist zunächst eine Referenzfahrt auszuführen. Durch Betätigung der Schaltfläche "Starten" wird die Referenzfahrt ausgeführt.



2. Nach der erfolgten Referenzfahrt kann der Shutter über Eingabe der gewünschten Soll-Position und anschließender Betätigung der Schaltfläche "Positionieren" verfahren werden. Alternativ kann der Shutter über die Schaltflächen "Offen" und "Geschlossen" vollständig geöffnet oder geschlossen werden.



3. Optional kann das Fahrprofil über Eingabe der Eigenschaftswerte und anschließender Betätigung der Schaltfläche "Übernehmen" verändert werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Werte nur nach Einarbeitung in die Motorsteuerung verändert werden sollten. Ungeeignete Eingaben können zum Fehlverhalten der Anlage führen!

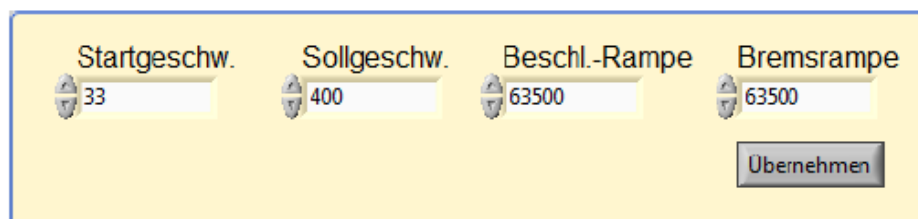
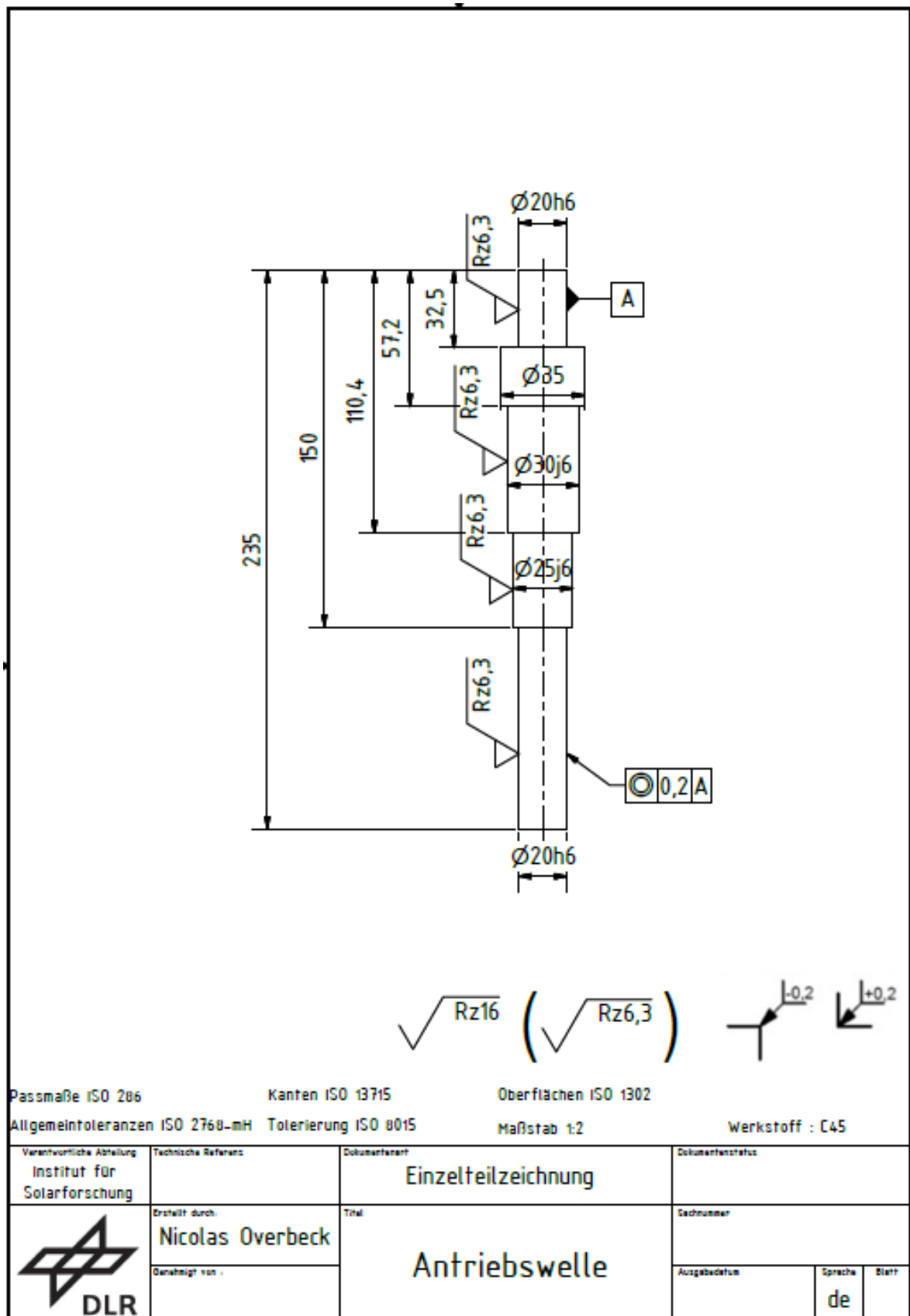
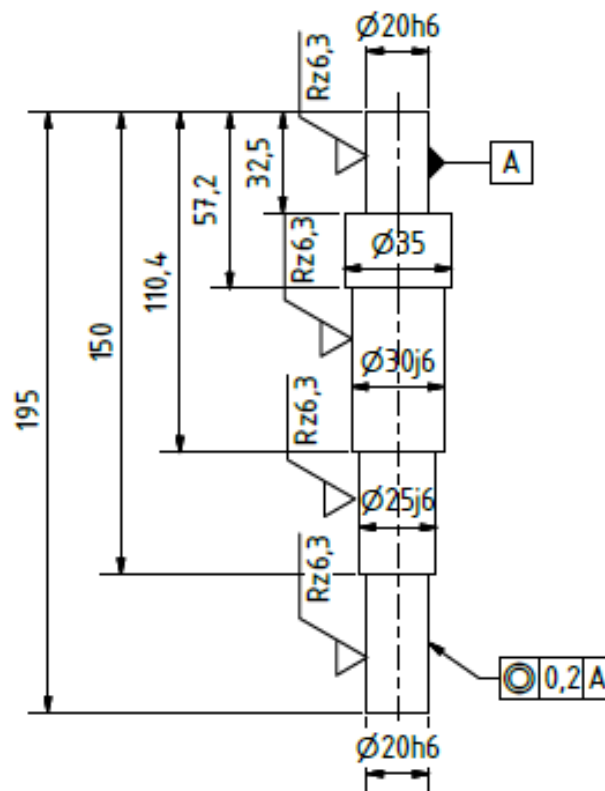


Abbildung 116 Bedienungsanweisung des Teleskopshutters (als .pdf-Datei im digitalen Anhang

## B Technische Zeichnungen

- als .pdf-Datei auch im digitalen Anhang hinterlegt





$\sqrt{Rz16}$  (  $\sqrt{Rz6,3}$  )

$\sqrt{-0,2}$   $\sqrt{+0,2}$

Passmaße ISO 286


Kanten ISO 13715

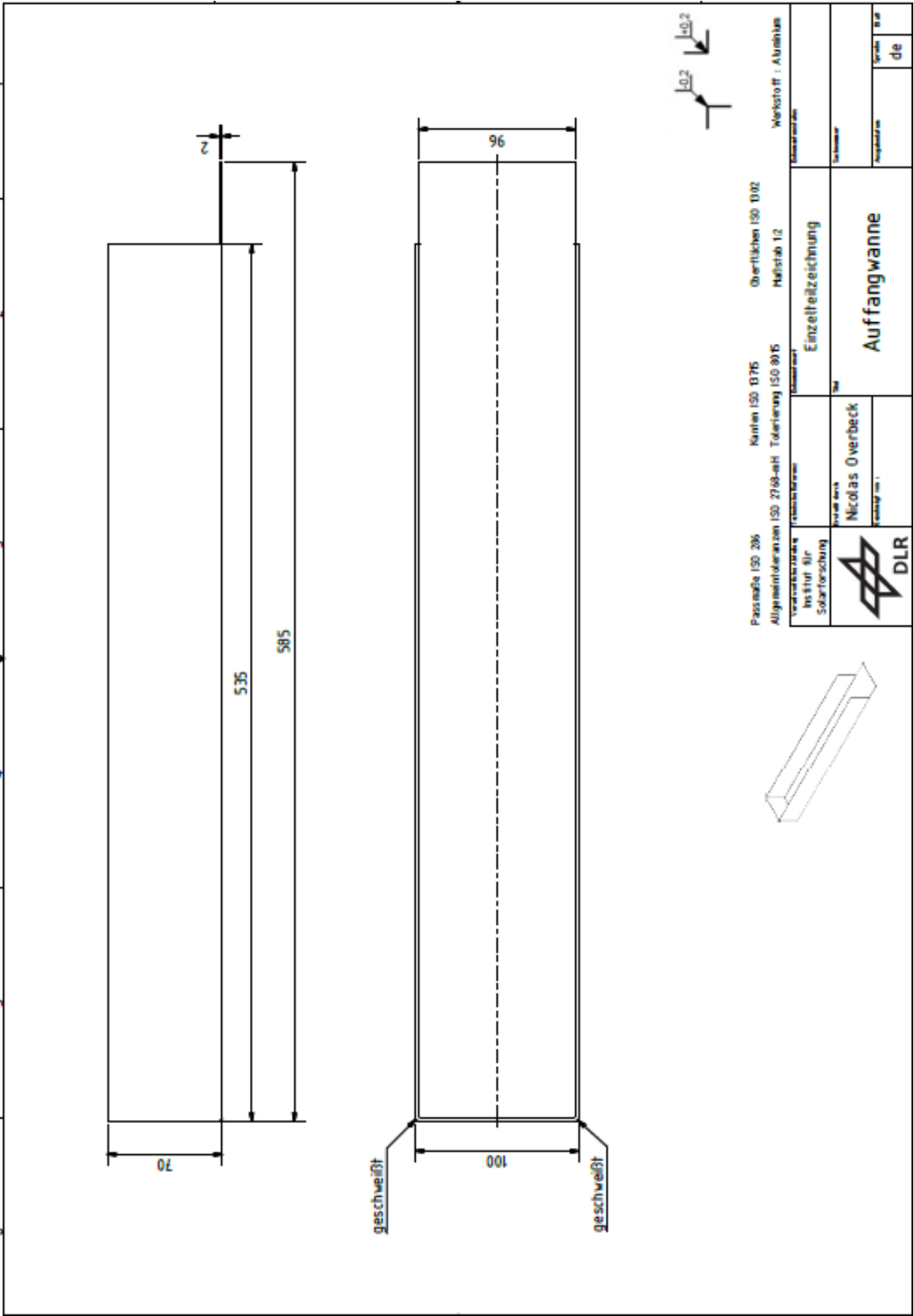
Oberflächen ISO 1302

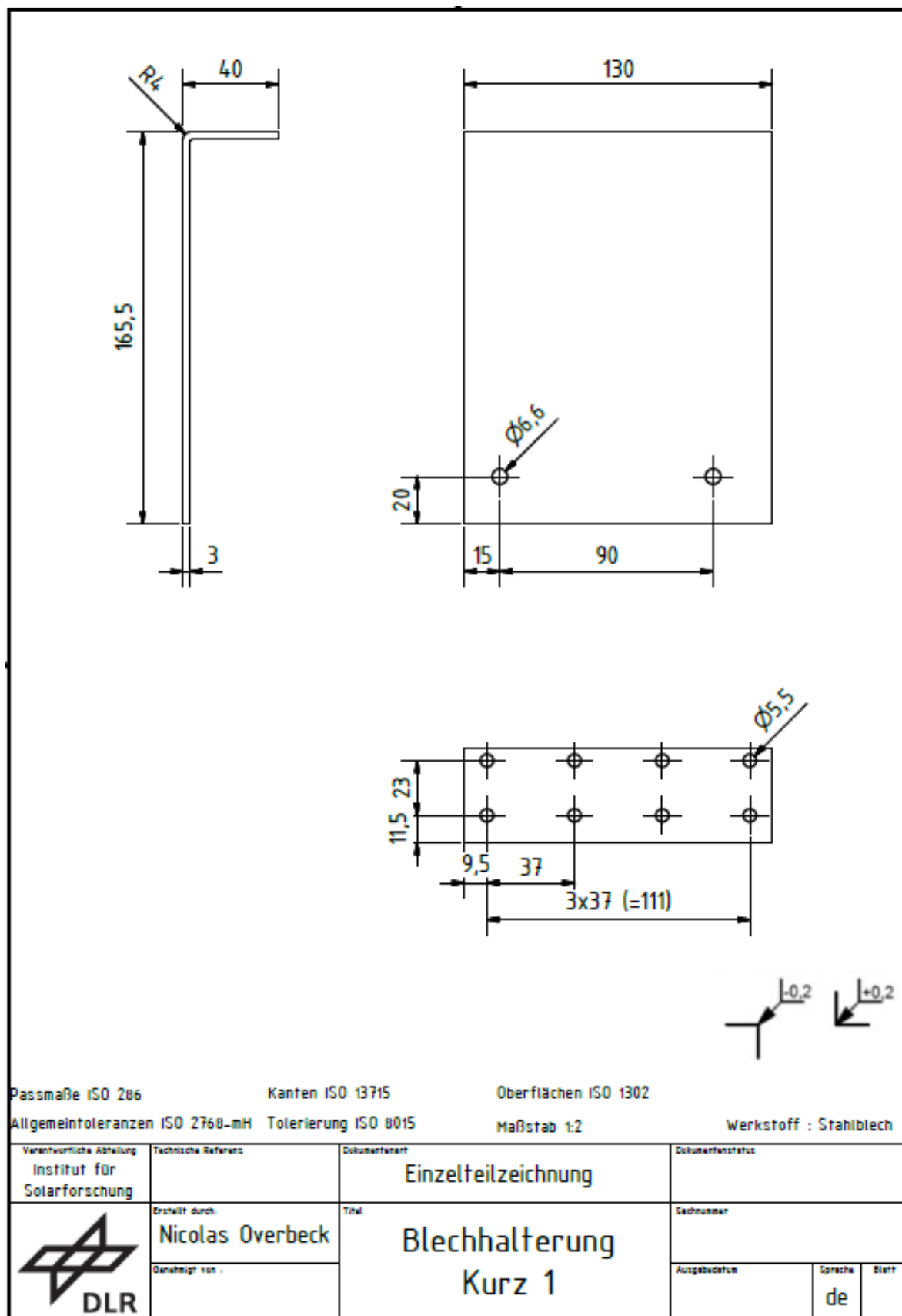
Allgemeintoleranzen ISO 2768-mH Tolerierung ISO 8015

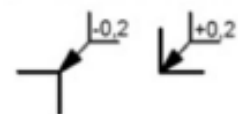
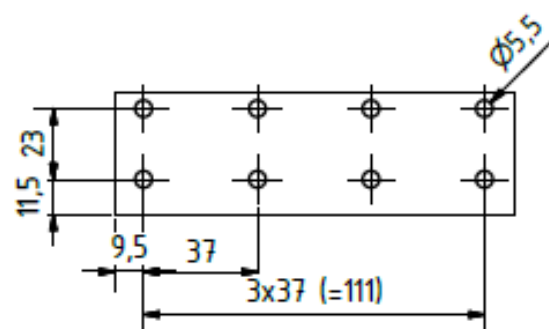
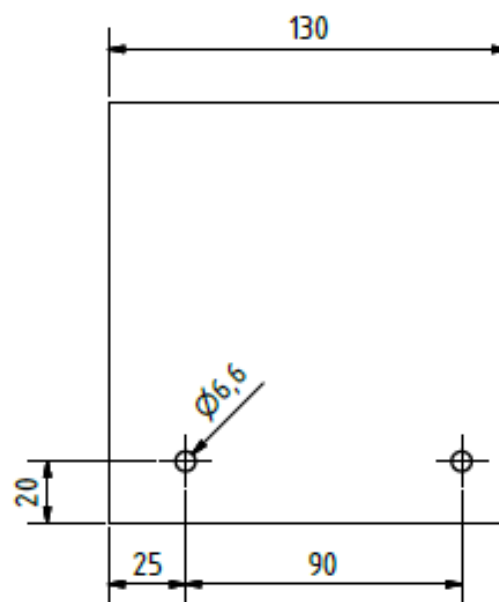
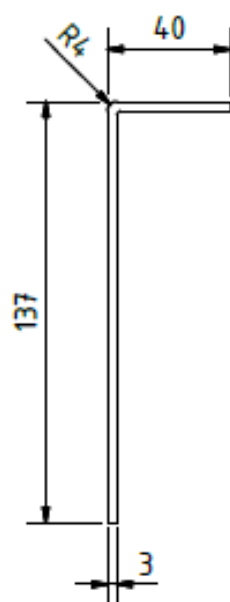
Maßstab 1:2

Werkstoff : C45

Vantwortliche Abteilung Institut für Solarforschung	Technische Referenz	Dokumententyp Einzelteilzeichnung	Dokumententstatus
 DLR	Erstellt durch: Nicolas Overbeck	Titel Umlenkswelle	Zeichnungsnummer
	Genehmigt von :		Ausgabedatum
			Sprache de
			Blatt







Passmaße ISO 286


Kanten ISO 13715

Oberflächen ISO 1302

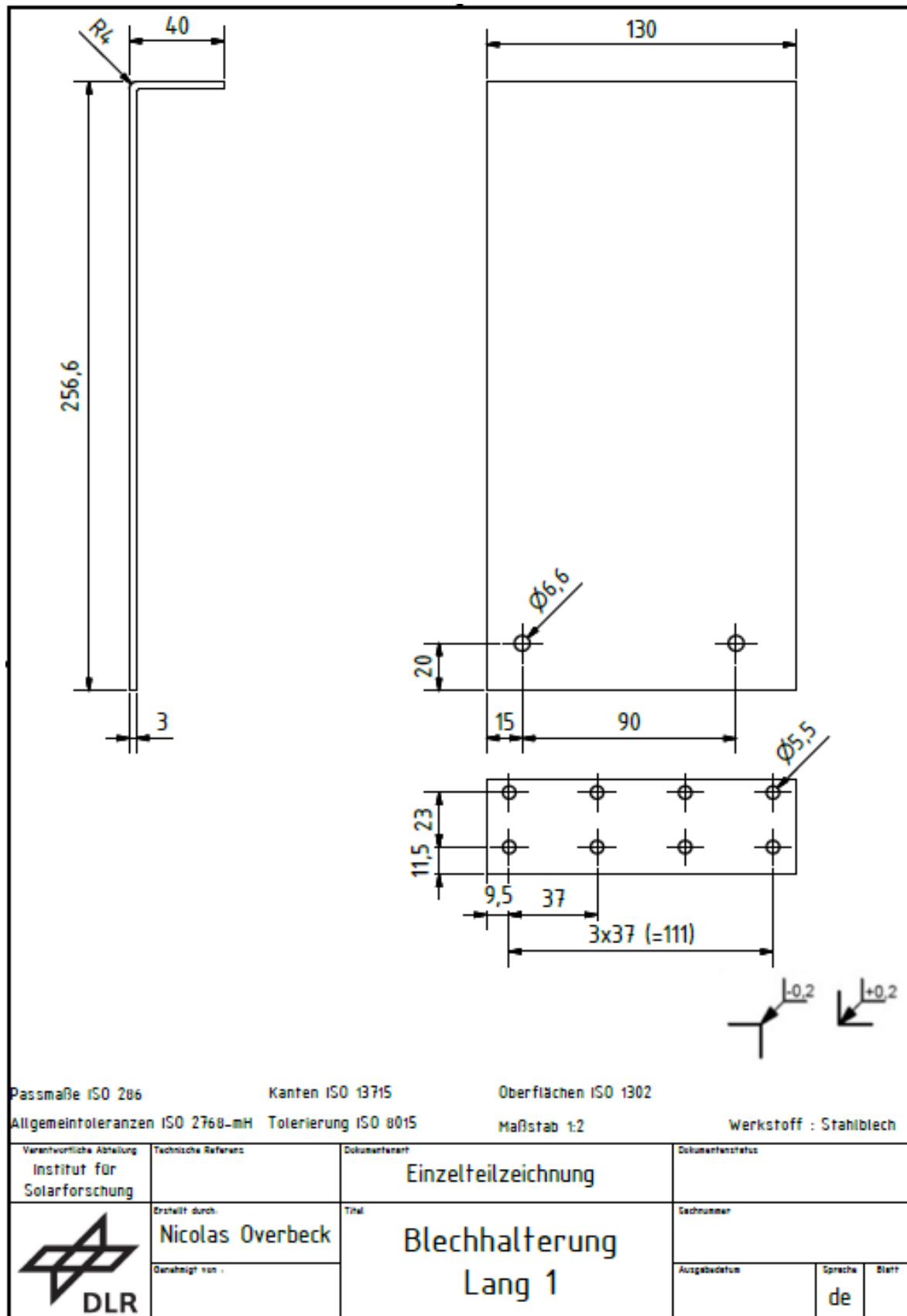
Allgemeintoleranzen ISO 2768-mH Tolerierung ISO 8015

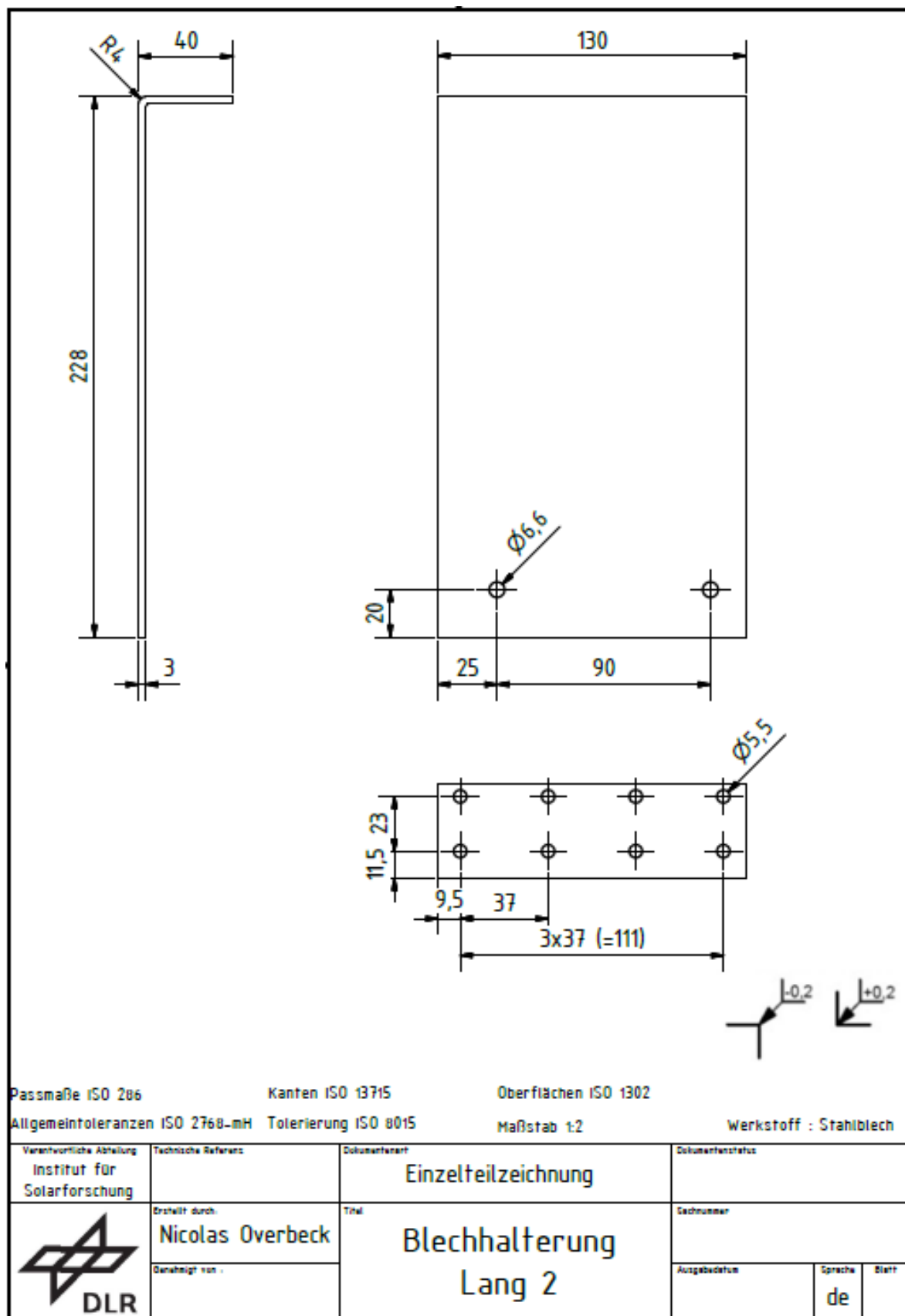
Maßstab 1:2

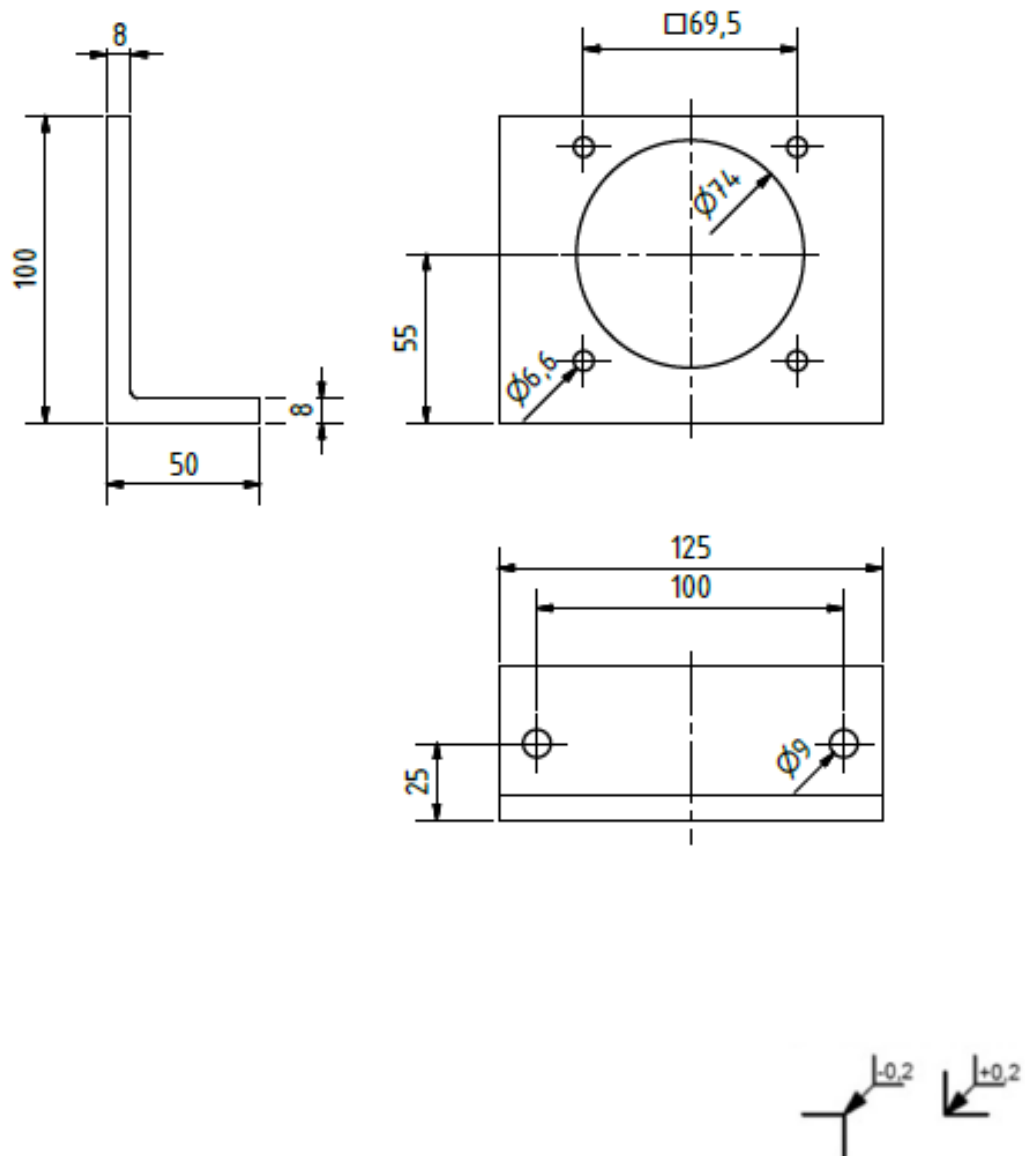
Werkstoff : Stahlblech

Verantwortliche Abteilung Institut für Solarforschung	Technische Referenz	Dokumententyp <b>Einzelteilzeichnung</b>	Dokumentenzustand		
	Erstellt durch <b>Nicolas Overbeck</b>	<b>Blechhalterung Kurz 2</b>	Sachnummer		
	Genehmigt von		Ausgabedatum	Sprache <b>de</b>	Blatt









Passmaße ISO 286

Kanten ISO 13715


Oberflächen ISO 1302

Allgemeintoleranzen ISO 2768-mH

Tolerierung ISO 8015

Maßstab 1:1

Werkstoff : Aluminium

Vantwortliche Abteilung Institut für Solarforschung	Technische Referenz	Dokumententwurf Einzelteilzeichnung	Dokumentenstatus
	Erstellt durch: Nicolas Overbeck	Titel Motorhalterung	Sachnummer
	Genehmigt von :		Ausgabedatum Sprache de Blatt

## C LabView<sup>®</sup> Sub-VI's

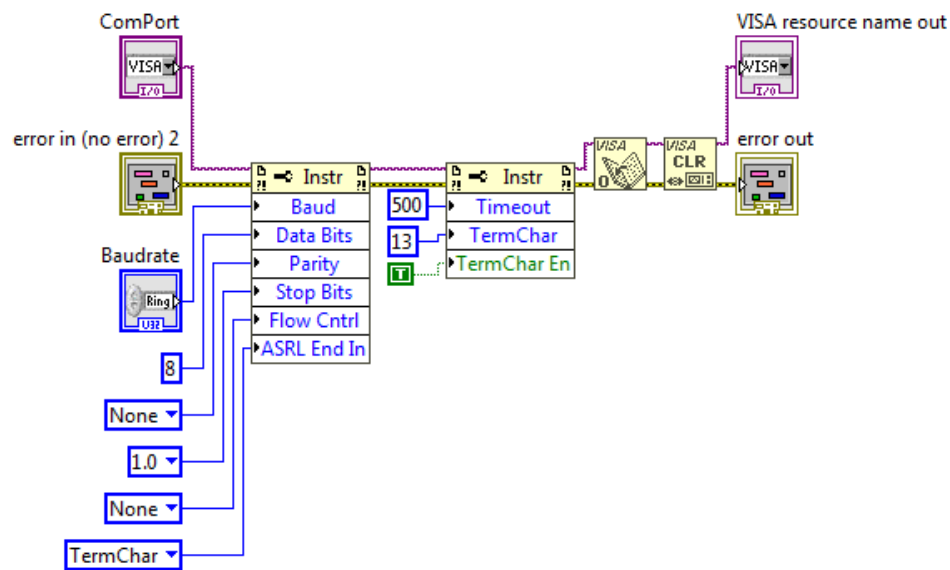


Abbildung 117 Nanotec-Sub-VI "OPEN VISA"

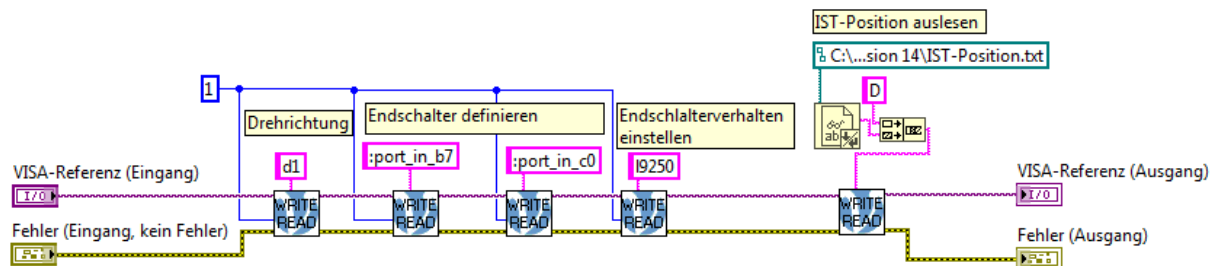


Abbildung 118 Sub-VI "CONFIG"

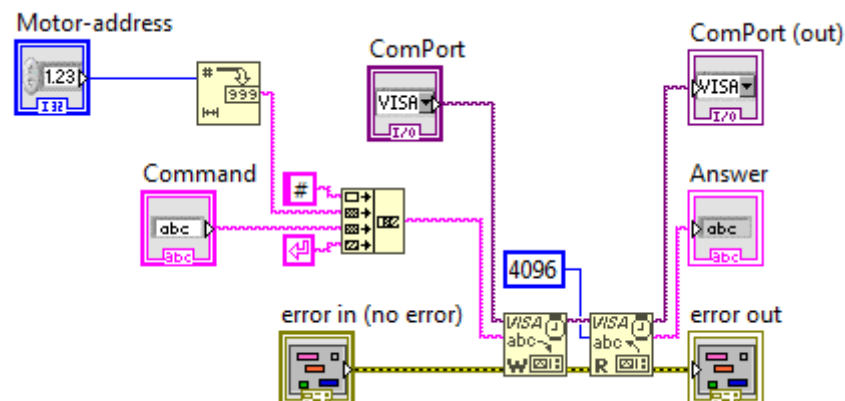


Abbildung 119 Nanotec-Sub-VI "WRITE READ"

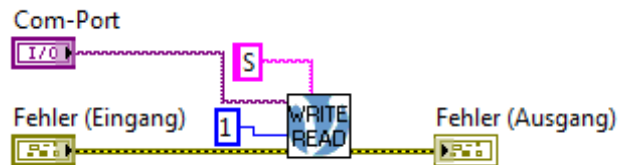


Abbildung 120 Sub-VI "Quick Stop"

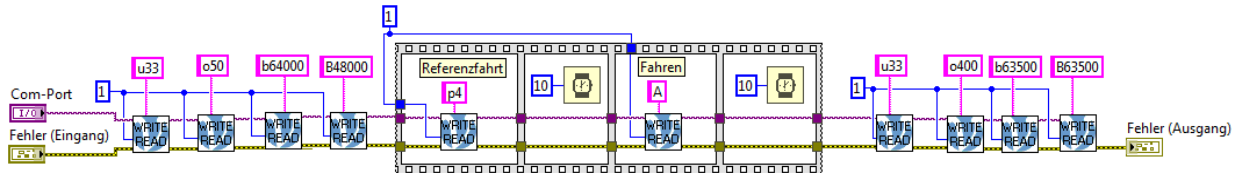


Abbildung 121 Sub-VI "Referenzfahrt"

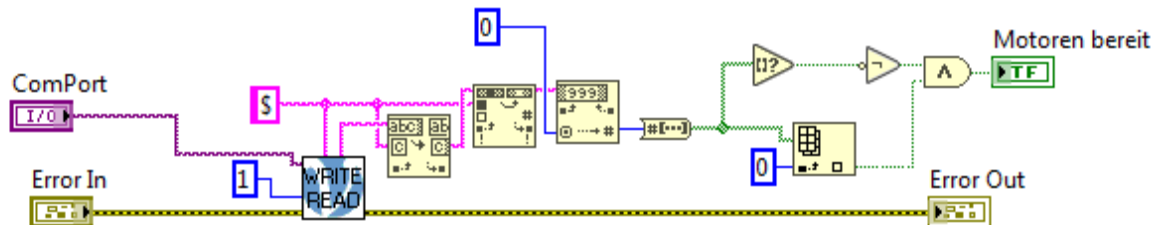


Abbildung 122 Sub-VI "Status"

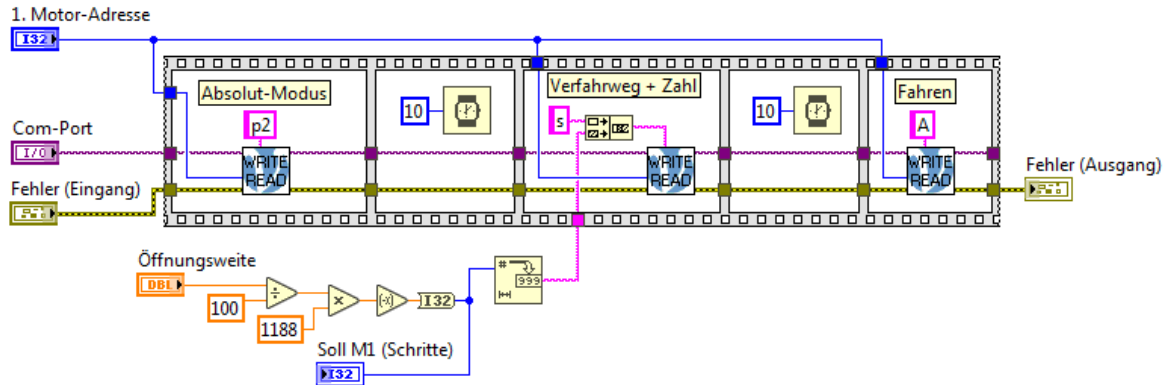


Abbildung 123 Sub-VI "Absolutfahrt"

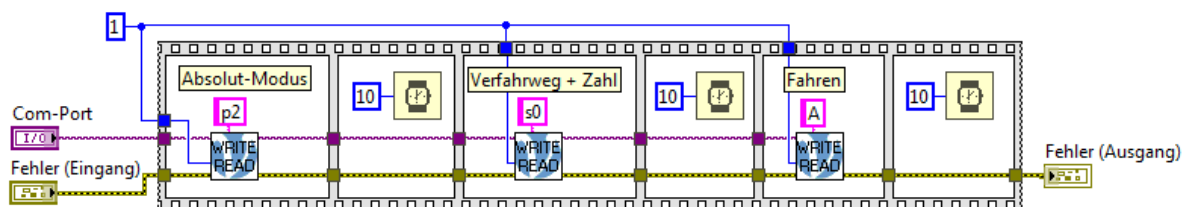


Abbildung 124 Sub-VI "AUF"

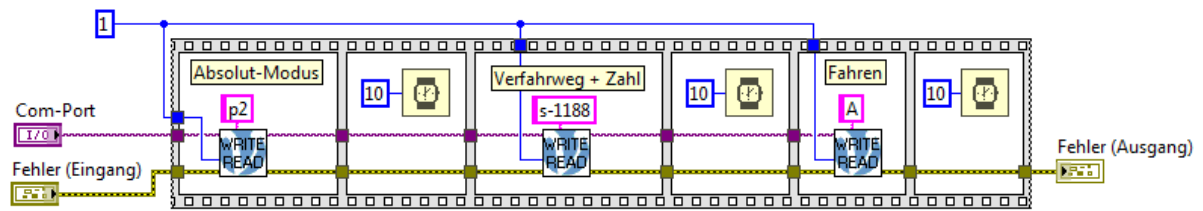


Abbildung 125 Sub-VI "ZU"

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Arbeitsweise des Sonnenofens am Standort Köln (verändert nach [1]).....	1
Abbildung 2 Aufbau des Hochleistungsstrahlers [1] .....	2
Abbildung 3 Modell des sich im Bau befindlichen SynLight [1].....	3
Abbildung 4 Versuchsaufbau zur Simulation beschleunigter Alterungsprozesse [1].....	4
Abbildung 5 Visualisierte Darstellung eines Mond-Laboratoriums [2].....	5
Abbildung 6 Angedachte Position des Shutters (verändert nach [1]) .....	7
Abbildung 7 Querschnitt der Versuchseinrichtung „Hochleistungsstrahler“ .....	8
Abbildung 8 Einfaches CAD-Modell der Trennwand auf Seiten des Strahlerraums; Abmaße in mm .....	9
Abbildung 9 Schema der versetzt ausgerichteten Lampen (verändert nach [3]) .....	10
Abbildung 10 Überlagerung der Gaußverteilungen zu einem homogenen Leistungsprofil [3] .....	10
Abbildung 11 Messaufbau mit den 3 unterschiedlichen Sensoren zur Flussdichtemessung .....	11
Abbildung 12 Verschaltung vom Messaufbau aus Abbildung 11 [1] .....	11
Abbildung 13 Messaufbau zur optischen Flussdichtemessung [1].....	12
Abbildung 14 Ausgabe der optischen Flussdichtemessung; Betrieb mit den Lampen A2, B2, B3, C2 [1].....	12
Abbildung 15 Strahlungseigenschaften eines Ellipsoid [4] .....	13
Abbildung 16 Abmaße der Ellipse zum Ellipsoidspiegels im HLS [1] .....	13
Abbildung 17 Simulationsergebnisse eines Ellipsoides mit einer punktförmigen Lichtquelle im Fokus F1 .....	13
Abbildung 18 Simulationsergebnisse eines Ellipsoides mit einer linienförmigen Lichtquelle im Fokus (geringe Anzahl an Strahlen) .....	14
Abbildung 19 Simulationsergebnisse eines Ellipsoides mit einer linienförmigen Lichtquelle im Fokus (hohe Anzahl an Strahlen) .....	14
Abbildung 20 Vergleich des Leistungsabfalls bei einer sich schließenden rechteckigen und kreisförmigen Öffnung.....	16
Abbildung 21 Asymmetrischer Lamellenshutter [1].....	21
Abbildung 22 Symmetrischer Lamellenshutter im Hochleistungsstrahler [1].....	21
Abbildung 23 Gateau-Shutter [5].....	22



---

Abbildung 24 Öffnungsmechanismus des Gateau-Shutters [5] .....	22
Abbildung 25 Iris-Shutter in der Frontansicht.....	23
Abbildung 26 Iris-Shutter in der Rückansicht.....	23
Abbildung 27 2-Plattenshutter am Sonnenofen [1] .....	23
Abbildung 28 Lamellenshutter des HFSS an der CIE-UNAM in Temixco [6] .....	24
Abbildung 29 Lamellenshutter des SF-60 in Almeria [7] .....	24
Abbildung 30 Lamellenshutter des HFSS am Paul Scherer Institut [1] .....	24
Abbildung 31 Lamellenshutter des HFSS KIRAN-42 [8] .....	24
Abbildung 32 Abblendvorrichtung für Röntgenstrahlung [9] .....	25
Abbildung 33 Abblendvorrichtung für Röntgenstrahlung [10] .....	25
Abbildung 34 Bewegungsprinzip eines Plattenshutters [11].....	25
Abbildung 35 Regelbare Blende [12].....	25
Abbildung 36 Irisshutter mit Drehelementen [13] .....	26
Abbildung 37 Irisshutter mit Schiebeelementen [14] .....	26
Abbildung 38 Faltschiebeläden [15] .....	26
Abbildung 39 Faltscherenläden [16] .....	26
Abbildung 40 Funktionsprinzip elektrochromer Gläser [17] .....	27
Abbildung 41 Schema eines variablen Abschwächers bestehend aus einer Verzögerungsplatte und eines Polarisators [18] .....	27
Abbildung 42 Schema eines dielektrischen Spezialspiegels [18].....	27
Abbildung 43 Morphologischer Kasten .....	29
Abbildung 44 Schiebelamellenshutter .....	31
Abbildung 45 Rautenshutter .....	31
Abbildung 46 Teleskopshutter .....	31
Abbildung 47 Partieller Shutter.....	31
Abbildung 48 Drehtürshutter .....	32
Abbildung 49 Schwenktürshutter .....	32
Abbildung 50 Faltscherenlamellenshutter .....	32
Abbildung 51 Bewegliche Lochblende .....	32
Abbildung 52 Faltlamellenshutter.....	33
Abbildung 53 Symmetrischer Lamellenshutter .....	33
Abbildung 54 Iris-Shutter mit drehbaren Lamellen.....	33

---

Abbildung 55 Iris-Shutter mit schiebbaren Lamellen .....	33
Abbildung 56 Ergebnis der Bewertung in Form von Netzdiagrammen .....	36
Abbildung 57 Ermittlung der maximalen thermischen Belastung für eine Lamelle .....	40
Abbildung 58 Flüssigkeitskühler der Fa. Austerlitz Electronic GmbH [19] .....	41
Abbildung 59 Lokale Netzverfeinerung im Bereich der Kühlkanalwand .....	41
Abbildung 60 Modell des Flüssigkeitskühlers mit Angabe der aufgetragenen Flussdichten .....	42
Abbildung 61 Ergebnis der Berechnung mit Angabe der zu erwartenden Temperaturen .....	42
Abbildung 62 Versuchsaufbau zur Ermittlung der thermischen Belastung am Sonnenofen .....	43
Abbildung 63 Flussdichtemessung mit der Software FMAS bei 10% Shutteröffnung.....	44
Abbildung 64 Flussdichtemessung mit der Software FMAS bei 25% Shutteröffnung.....	44
Abbildung 65 Wärmebild der Kühlelemente bei 10% Shutteröffnung .....	45
Abbildung 66 Wärmebild der Kühlelemente bei 25% Shutteröffnung .....	45
Abbildung 67 Anordnung der Baugruppen .....	46
Abbildung 68 Realisierung der Führung und der Teleskopfunktion nach dem Mitnehmerprinzip; Bild u. r.: Laufrollenführung der Fa. Maschinenbau Kitz GmbH [20] .....	47
Abbildung 69 Realisierung der Führung und des Antriebs über getrennte Führungen und zwei umlaufenden Trieben; Bild u. r.: C-Schienenführung der Fa. item Industrietechnik GmbH [21] .....	48
Abbildung 70 Anordnung der Kühlschläuche im geschlossenen Zustand .....	49
Abbildung 71 Anordnung der Kühlschläuche im geöffneten Zustand .....	49
Abbildung 72 Vorläufiges CAD-Modell des Teleskopshutters.....	50
Abbildung 73 Vorläufige Antriebs- und Führungseinheit.....	51
Abbildung 74 Vorläufige Antriebs- und Führungseinheit in der Frontansicht.....	51
Abbildung 75 Freigemachte Führungseinheit .....	52
Abbildung 76 Freigemachte Antriebseinheit .....	54
Abbildung 77 Motorkennlinie [22].....	55
Abbildung 78 Freigemachte Antriebseinheit .....	55
Abbildung 79 Freigemachte Lagereinheit.....	58
Abbildung 80 Stehlagereinheit der Fa. FYH [24].....	58

---

Abbildung 81 Erlaubtes Verkippspiel der Stehlagereinheiten [25] .....	58
Abbildung 82 Querkraftverlauf der Antriebswelle .....	59
Abbildung 83 Biegemomentenverlauf der Antriebswelle.....	59
Abbildung 84 C-Schienenführung der Fa. item [26].....	61
Abbildung 85 Ausgearbeitetes CAD-Modell.....	62
Abbildung 86 Teleskopshutter im geöffneten Zustand (Blechabdeckungen ausgeblendet) .....	63
Abbildung 87 Teleskopshutter im geschlossenen Zustand (Blechabdeckungen ausgeblendet) .....	63
Abbildung 88 Ausschnitt der Antriebseinheit.....	64
Abbildung 89 Anbindung der Kühllamellen an den Führungsschlitten und dessen Anbindung an den Zahnriemen (andere Führungsschiene ist ausgeblendet) .....	64
Abbildung 90 Ausschnitt der Umlenkeinheit.....	65
Abbildung 91 Auffangwanne; Schaltschrank lilafarbend dargestellt .....	65
Abbildung 92 Motorsteuerung SMCI47-S [27] .....	67
Abbildung 93 Bedieneroberfläche des Shutters .....	68
Abbildung 94 Abfrage zum Start einer Referenzfahrt bei Programmstart.....	69
Abbildung 95 Eingabe der gewünschten Sollposition.....	70
Abbildung 96 Anzeige der erreichten Sollposition.....	70
Abbildung 97 Gesamtansicht des Blockdiagramms in LabVIEW® .....	72
Abbildung 98 Gesamtansicht des Blockdiagramms beim "TRUE"-Case .....	73
Abbildung 99 Ereignisstruktur; Case: Timeout; Erster Start: True.....	74
Abbildung 100 Ereignisstruktur; Case: Timeout; Erster Start: False.....	74
Abbildung 101 Ereignisstruktur; Case: Absolut-Fahrt.....	75
Abbildung 102 Ereignisstruktur; Case: Referenzfahrt .....	75
Abbildung 103 Ereignisstruktur; Case: Offen.....	76
Abbildung 104 Ereignisstruktur; Case: Geschlossen.....	76
Abbildung 105 Ereignisstruktur; Case: Wertänderung .....	77
Abbildung 106 Ausschnitt aus der Gesamtansicht des Blockdiagramms .....	77
Abbildung 107 Schaltschrank .....	78
Abbildung 108 Vormontierte Führungs- und Antriebseinheit.....	79

---

Abbildung 109 Draufsicht auf die vormontierte Führungs- und Antriebseinheit .....	79
Abbildung 110 Mit "Pyromark 1200" mattschwarz angestrichene Kühl lamellen .....	80
Abbildung 111 Teleskopshutter im Betrieb.....	80
Abbildung 112 Testbestrahlung mit der Strahlerkonfiguration: A2, B2, B3, C2.....	81
Abbildung 113 Testbestrahlung mit der Strahlerkonfiguration: A2, B1, B2, B3, B4, C2 .	81
Abbildung 114 Testbestrahlung mit der Strahlerkonfiguration: A1, A2, B1, B4, C1, C3 .	82
Abbildung 115 Testbestrahlung mit der Strahlerkonfiguration: A1, A3, B1, B2, B3, B4, C1, C3 .....	82
Abbildung 116 Bedienungsanweisung des Teleskopshutters (als .pdf-Datei im digitalen Anhang.....	90
Abbildung 117 Nanotec-Sub-VI "OPEN VISA" .....	99
Abbildung 118 Sub-VI "CONFIG" .....	99
Abbildung 119 Nanotec-Sub-VI "WRITE READ" .....	99
Abbildung 120 Sub-VI "Quick Stop" .....	100
Abbildung 121 Sub-VI "Referenzfahrt" .....	100
Abbildung 122 Sub-VI "Status" .....	100
Abbildung 123 Sub-VI "Absolutfahrt" .....	100
Abbildung 124 Sub-VI "AUF" .....	100
Abbildung 125 Sub-VI "ZU" .....	101

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 Ergebnisse aus der Simulation einer rechteckigen Öffnung .....	17
Tabelle 2 Fortsetzung von Tabelle 1 .....	18
Tabelle 3 Ergebnisse aus der Simulation mit einer kreisförmigen Öffnung .....	19
Tabelle 4 Fortsetzung von Tabelle 3 .....	20
Tabelle 5 Auswahlliste .....	34
Tabelle 6 Bewertungskriterien zur Nutzwertanalyse .....	35
Tabelle 7 Ergebnis der Bewertung .....	35
Tabelle 8 Dominanzmatrix .....	38
Tabelle 9 Ergebnis der Nutzwertanalyse .....	38
Tabelle 10 Bewertungsbogen zur Nutzwertanalyse .....	88

**Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

---

Ort, Datum

---

Nicolas Overbeck

Hiermit wird Herrn Nicolas Overbeck bestätigt, dass er seine Abschlussarbeit heute bei mir,  
\_\_\_\_\_, abgegeben hat.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## **Danksagung**

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dr. Hans-Gerd Dibowski beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken. Auch meine Kollegen in der Abteilung haben dazu beigetragen, dass diese Masterthesis nun so vorliegt.

Daneben gilt mein Dank Prof. Dr. Stefan Grünwald, der mich Seitens der Hochschule betreut und durch sinnvolle Ratschläge unterstützt hat.

Nicht zuletzt gebührt meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung Dank. Besonders hervorheben möchte ich meine Eltern Heinrich und Mechthild Overbeck, die mir durch ihre Unterstützung mein Studium ermöglicht haben. Danken möchte ich auch meiner Freundin Lisa Nienhaus, die mich mit viel Geduld moralisch und emotional unterstützt hat.